

**UNIVERSITE PARIS-EST**

Ecole Doctorale Ville Environnement  
Laboratoire Ville Mobilité Transport

**Thèse de doctorat**

Spécialité Transport

**Conception et application d'un modèle de  
l'information routière et ses effets sur le trafic**

présentée et soutenue publiquement  
par Thai-Phu NGUYEN

le 29 juin 2010

sous la direction de Fabien LEURENT

**Composition du jury**

Jean-Baptiste LESORT,	rapporteur
Laura WYNTER,	rapporteuse
Vincent AGUILERA,	examineur
Jean-Patrick LEBACQUE,	examineur
Markos PAPAGEORGIOU,	président du jury
Fabien LEURENT,	directeur de thèse







## Résumé

---

La circulation sur un réseau routier subit souvent de la congestion. Selon ses sources, la congestion routière peut être classée en deux catégories : la congestion récurrente déterminée par les lois physiques du trafic et la congestion non-récurrente due aux incidents, accidents ou autres aléas sur la route.

Grâce à l'avancement des technologies, notamment en informatique, communication et techniques de traitement des données, les opérateurs routiers sont devenu capable de détecter les perturbations, de mesurer les effets et même d'anticiper l'état du trafic afin de mieux adapter ses actions d'exploitation. L'information dynamique concernant les conditions de la circulation en temps réel permet aux usagers de réduire l'inconfort et d'effectuer leur choix d'itinéraire de manière plus raisonnable. Pour l'exploitant, le service d'information aux usagers peut servir à la gestion du trafic.

Nous avons étudié la contribution potentielle de l'information dynamique au profit individuel des usagers et à la performance collective du système en tenant compte : i) la congestion récurrente et non-récurrente ; ii) de différents comportements de choix d'itinéraire en fonction de l'accessibilité à l'information ; iii) de différentes stratégie de gestion du trafic menées par l'exploitant.

Un modèle théorique avec une application analytique sur un réseau élémentaire de deux routes parallèles, une paire origine-destination et deux classes d'usagers respectivement informée ou non-informée nous a permis de retirer de nombreuses indications : i) la diffusion excessive de l'information dynamique avec un contenu « *neutre* » dégrade à la fois le profit individuel et la performance du système ; ii) l'information dynamique avec certain contenu « *coopératif* » peut contribuer l'optimisation du système sans causer un problème d'acceptabilité ; iii) l'information dynamique et les stratégies de gestion dynamique s'interagissent de manière complémentaire à l'optimisation du trafic.

### Mots clés

Information dynamique ; Congestion récurrente ; Congestion non-récurrente ; Perturbations Gaussiennes ; Perturbations Bernoulli-exponentielles ; Affectation multi-classe ; Affectation stochastique ; Equilibre de l'utilisateur ; Optimum du système ; Equilibre bi-niveau ; Pseudo-équilibre ; Tarification de la congestion ; Allocation variable de capacité.



## Abstract

---

Title: *"Modelling dynamic traffic information and its effects on road network"*

Traffic conditions on a road network often suffer from congestion. According to sources, traffic congestion can be classified into two categories: recurrent congestion determined by the physic laws of traffic and non-recurrent congestion due to incidents, accidents or other hazards on the road.

Thanks to the advancement of technologies, including computers, communications and data processing, the traffic operator is now able to detect disturbances, to measure the effects and even to anticipate traffic conditions to better match traffic management activities. Dynamic information on traffic conditions enables users to reduce discomfort and to make their route choice decision more reasonable. For the operator, the service user information may be used as a traffic management tool.

We investigated the potential contribution of dynamic traffic information for the benefit of individual users and the performance of the system by taking into account: i) recurring congestion and non-recurring congestion; ii) different route choice behaviours based on accessibility to information service ; iii) other traffic management actions taken by the traffic operator.

A theoretical model with an analytical application on a simple two-parallel-road network, an origin-destination pair and two user classes, respectively-informed or non-informed, has allowed to draw the following conclusions: i) an excessive distribution of traffic information with a « neutral » content damages both the individual profit and the system performance ; ii) traffic information with some « cooperative » content may help optimize the system performance without causing an acceptability problem ; and iii) dynamic information and other traffic management tools interplay in a complementary manner to optimize the traffic.

### Keywords

Dynamic traffic information ; Recurrent congestion ; Non-recurrent congestion; Gaussian disruptions ; Bernoulli-Exponential disruptions; multi-class assignment; Stochastic assignment ; User Equilibrium; System optimum ; Bi-level equilibrium ; Pseudo-equilibrium ; Congestion pricing ; Variable capacity allocation.





## Résumé long

---

### CONTEXTE

Selon ses sources, la congestion routière, un problème économique, politique et environnemental sérieux de la société moderne, peut être classée en deux catégories : la congestion récurrente et la congestion non-récurrente. La congestion récurrente est due à l'insuffisance de l'offre par rapport à la demande dans une condition normale. La congestion non-récurrente est due à des perturbations sur le réseau qui réduisent éventuellement les capacités d'une partie du réseau ou réduisent la vitesse pratiquée, par exemple un incident, un accident, un chantier sur la route, mauvaises conditions météorologiques. Certaines perturbations sont prévisibles, par exemple les travaux programmés, d'autres sont moins prévisibles comme les mauvaises conditions météorologiques, voire complètement imprévisibles comme les incidents, les accidents sur la route. D'après un certain nombre de rapports de l'OCDE (OCDE, 1998; OCDE, 2002; OCDE, 2007), la part de la congestion non-récurrente dans l'ensemble de la congestion varie en fonction de l'endroit mais elle reste dans un ordre de grandeur considérable, en particulier pour les grandes agglomérations.

Pour lutter contre la congestion, on peut créer de nouvelles infrastructures pour absorber la demande. Cependant la construction nouvelle est souvent confrontée à multiples contraintes et elle n'est pas capable de résoudre effectivement la congestion non-récurrente. Aujourd'hui, une idée largement adoptée est que la lutte contre la congestion doit être basée sur un meilleur usage de l'infrastructure. En profitant des avancements en technologies de communication et d'information et de traitement de données, les modules de recueil et de traitement de données dans un système de gestion du trafic informatisé deviennent capables de fournir une connaissance fiable et précise, en temps réel sur l'état du trafic, en s'appuyant sur laquelle l'opérateur du réseau peut appliquer des mesures permettant de réduire les impacts négatifs de la dynamique du trafic routière. En France, non seulement les réseaux autoroutiers concédés ASFA (COFIROUTE, SAPN, SANEF, APRR, etc.) mais aussi la partie du réseau magistral gérée par l'Etat et les collectivités locales sont équipés en système de gestion dynamique du trafic, par exemple le SIRIUS en Ile de France, le CORALY sur Grand Lyon, le MARIUS à Marseille (Chaput, 2004).

Par ailleurs, l'information dynamique du trafic routière peut être communiquée aux usagers. Pour un usager, la disposition d'une information précise sur les conditions de circulation lui permet de réduire leur stress mais aussi d'effectuer son choix de déplacement de manière plus intelligente : il peut adapter son choix de déplacement afin de minimiser son exposition à la congestion et aux

perturbations. Pour l'opérateur du réseau, les choix des usagers mieux informés peuvent éventuellement contribuer à mieux gérer les perturbations ainsi que optimiser la demande.

## REVUE DE LITTÉRATURE

La question essentielle posée pour la thèse est donc l'information dynamique est-elle nécessaire pour l'utilisateur et pour la collectivité ? Quel gain peut-on retirer de la diffusion et de l'usage de l'information routière ?

Poursuivant la dernière, de nombreuses autres questions se posent : comment diffuser de l'information du trafic d'une manière qu'elle puisse contribuer à réduire la congestion ? Comment la diffusion doit-elle être en synchronisation avec d'autres mesures d'exploitation ? Quel modèle commercial peut être adopté pour le service d'information routière ? etc.

Il semble que les outils existants et les méthodes traditionnelles ne permettent pas d'effectuer des évaluations pertinentes car ils ne sont pas capables de capturer les phénomènes et les interactions liés à l'information routière essentielles dans un système routier. Lors d'un séminaire de l'ATEC-ITS France, les chercheurs et les praticiens ont évoqué le besoin méthodologique pour mieux discerner cette problématique (Nguyen, 2007).

Dans la pratique d'exploitation du trafic routière, les conséquences d'un cas particulier de perturbation, par exemple un accident, en présence de la congestion récurrente, de l'information routière, et des actions de gestion du trafic sont souvent analysées par simulation microscopique (Al-Deek, Khatkhaty *et al.*, 1998), (Hu, Wang *et al.*, 2005) et (Levinson, Gillen *et al.*, 1999; Levinson, 2003). Cependant, les enseignements donnés par simulation microscopique sont parfois peu pertinentes et peu concluants parce que :

- La simulation microscopique ne reproduit que certains scénarii de perturbation, pas une exhaustivité des cas possibles.
- La simulation microscopique n'est pas capable de reproduire l'état l'équilibre du trafic donc de prendre en compte les effets des perturbations, de l'information routière et de la gestion du trafic sur le long terme.

Quant à la modélisation analytique, la distinction des sources de congestion et leurs interactions avec l'information dynamique de trafic a été correctement traitée pour le choix d'horaire de départ par (Noland, Small *et al.*, 1998), (Leurent, 2001; Leurent, 2004), (Saito, Yasui *et al.*, 1998) bien que cette approche analytique ne inclut pas la réaction des usagers à la congestion. Tout fois, concernant le choix d'itinéraire, l'affectation dynamique des années 2000 (Lo et Szeto, 2004), a pris le même cadre d'hypothèses que celle statique des années 1990 (Al-deek et Kanafani, 1989) (Van Vuren et Watling, 1991; Maher et Hughes,

1995), (Zhang et Verhoef, 2006) en supposant que les usagers informés perçoivent un temps de parcours déterministe pendant que les usagers non-informés perçoivent un temps de parcours stochastique. En fait, cette définition est exactement au contraire de la nature stochastique de la dynamique des perturbations éventuelles sur un réseau routier et de la définition de l'information dynamique : « *l'information routière sur l'état de la circulation et les perturbations auxquelles les automobilistes sont confrontés* » (Sétra, 1996).

## OBJECTIFS

Au niveau de conception, notre objectif de concevoir un cadre de modélisation permettant d'analyser la complexité de la diffusion de l'information dynamique et la multiplicité des interactions liées. Le modèle devra prendre en compte les éléments suivants :

- (i) **Le phénomène de congestion** : la congestion est un phénomène physique essentiel et spécifique du transport routier selon lequel une concentration accrue de véhicule, par leurs gênes mutuelles, dégrade la vitesse de chacun et la qualité de service de l'ensemble du système.
- (ii) **Les perturbations exogènes** : Le réseau routier peut être perturbé par un certain nombre de facteurs exogènes plus ou moins aléatoires tels qu'un incident, accident, conditions météorologiques difficiles, chantier sur la route, etc.
- (iii) **La présence de l'information dynamique** : le service d'information dynamique du trafic influence le choix de déplacement de ses usagers en améliorant leur connaissance de l'état du trafic et/ou leur donnant des conseils de guidage. Bien entendu, l'information dynamique devra être liée aux perturbations, un des facteurs principaux qui génèrent la dynamique des conditions de circulation – la raison pour laquelle le service d'information dynamique existe.
- (iv) **Comportement des usagers** : traditionnellement, le raisonnement de choix de déplacement des usagers est supposé purement économique. Il faudra pourtant distinguer les comportements de choix des usagers en fonction de leur connaissance de l'état du trafic, autrement dit du niveau d'accès à l'information dynamique.
- (v) **La gestion du trafic sur le réseau** : *a priori*, le service d'information et d'autres actions d'exploitation sont mutuellement dépendants car les mesures d'exploitation affectent la crédibilité de l'information et la diffusion de l'information, en revanche, conditionne le paramétrage des actions appliquées.

Au niveau d'application, bien que nous concevions un cadre de modélisation généralisable en grand réseau, nous nous limitons nos applications, dans le cadre de cette thèse de doctorat, à un cas d'école relativement simple afin d'éviter des

biais numériques constatés dans nombreux articles de la littérature scientifique et d'avoir des conclusions pertinentes.

## CADRE DE LA MODELISATION

La modélisation mathématique de l'affectation du trafic routier, qui combine des aspects relevant de plusieurs disciplines, s'inscrit dans un domaine scientifique et technique de modélisation pour l'ingénierie. Selon les éléments et les phénomènes pris en compte dans le modèle, notre modélisation réside dans trois natures : physique, économique et probabiliste. Bien que la nature physique du phénomène de congestion et la nature économique des comportements de choix soient conventionnelles, la nature probabiliste des perturbations est une spécificité de notre travail.

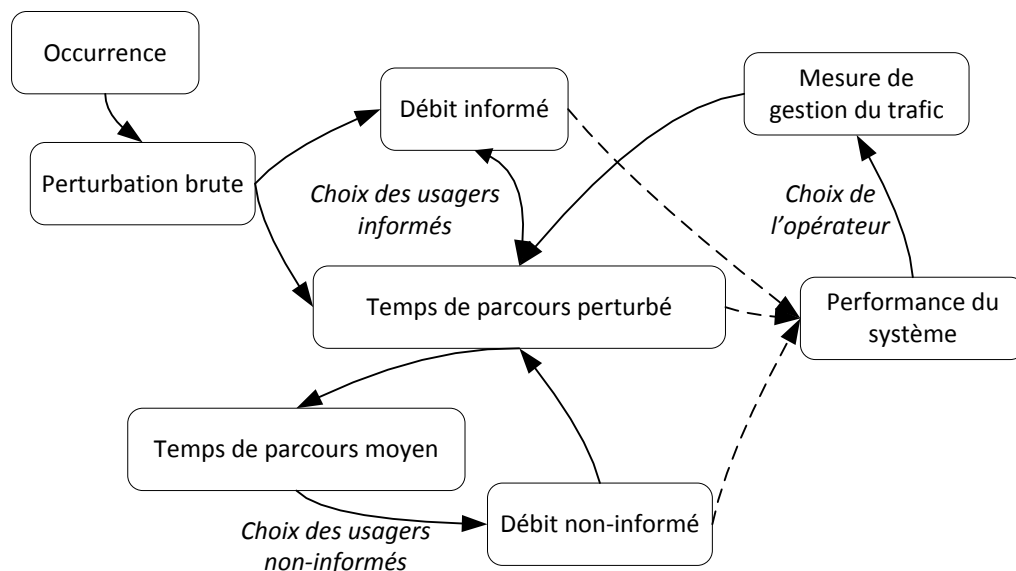


Fig. 0–1 : Cadre général de la modélisation

Nous avons développé un cadre de modélisation rigoureux destiné à analyser les effets de la diffusion de l'information dynamique aux usagers illustré en Fig. 0–1. Il s'agit d'un modèle innovant pour plusieurs raisons :

- (i) *Primo*, nous avons bien distingué les congestions venant de différentes sources : la congestion récurrente par la fonction débit-temps et les perturbations exogènes par des variables aléatoires. Cette distinction est cruciale pour modéliser des effets de l'information dynamique car les perturbations exogènes sont la cause principale de la variation des conditions de circulation – la raison d'être du service d'information dynamique.
- (ii) *Secundo*, nous avons bien distingué les deux stratégies de décision des usagers en fonction de l'information dont ils disposent. Comme les usagers informés ont une connaissance parfaite de la présence d'une perturbation

quelconque et puis de l'état du trafic, ils réagissent de manière instantanée aux perturbations. En absence de l'information dynamique, les usagers non-informés prennent de décision en fonction de leur expérience qui est capitalisée lors de leurs déplacements précédents.

(iii) *Tertio*, considérant les deux échelles temporelles liées aux perturbations exogènes et à la congestion ainsi que liées au comportement des usagers informés et des usagers non-informés, l'affectation du trafic a été formulée par un problème d'équilibre bi-niveau : à court terme, le choix d'itinéraire des usagers informés en fonction des conditions perturbées du trafic ; à long terme, le choix d'itinéraire des usagers non-informés en fonction des conditions moyennes du trafic. Chaque niveau d'équilibre impose des contraintes sur l'autre.

(iv) *Quarto*, ce cadre de modélisation permet d'intégrer de différentes actions de gestion du trafic et d'analyser les interactions de chacune avec la diffusion de l'information routière aux usagers.

Les effets de l'information dynamique ont été analysés à travers un jeu d'indicateurs économiques. Les indicateurs de coût (le coût par déplacement ressenti par un usager informé, un usager non-informé ou un usager en général) représentent les impacts sur chaque classe et la performance globale du système. Les indicateurs gain représentent la motivation des acteurs, notamment pour un usager individuel dans la décision d'être équipé ou non, pour l'exploitant dans l'élaboration d'une stratégie de diffusion de l'information.

## ENSEIGNEMENTS

L'application du cadre de modélisation pour un cas d'école simple : un réseau élémentaire de deux routes parallèles ; les fonctions débit-temps linéaires et additives ; deux classes d'usagers respectivement informée ou non-informée. Par des traitements analytiques et des investigations numériques, nous obtenons des renseignements suivants :

- l'information dynamique avec le contenu « *neutre* » ne contribue toujours à améliorer la performance du système : une diffusion excessive de l'information dynamique peut dégrader la performance du système.
- L'implantation de l'optimum du système par l'information dynamique aux usagers informés et par l'information statique aux usagers non-informés peut contribuer nettement à améliorer la performance du système mais elle est difficilement acceptable/implantable pour les usagers car certains usagers doivent subir des déplacements plus coûteux. Une stratégie d'information avec le contenu coopératif uniquement entre les usagers informés est à la fois performante pour l'exploitant et équitable pour les usagers.

- Il existe une complémentarité entre l'information dynamique et les actions de gestion dynamique du trafic : en complément de la contribution propre de chacune, elles génèrent également des effets conjoints permettant d'optimiser encore de plus la performance du système.

## Sommaire

---

Résumé.....	- 5 -
Abstract .....	- 7 -
Résumé long.....	- 9 -
Contexte .....	- 9 -
Revue de littérature .....	- 10 -
Objectifs .....	- 11 -
Cadre de la modélisation .....	- 12 -
Enseignements .....	- 13 -
Sommaire .....	- 15 -
Chapitre 1. Introduction générale.....	- 19 -
1.1. Contexte .....	- 19 -
1.2. Problématique.....	- 23 -
1.3. Objectifs .....	- 25 -
1.4. Méthodologie.....	- 26 -
1.5. Contenu du mémoire .....	- 29 -
Partie I. Service d'information dans un système routier.....	- 33 -
Chapitre 2. Services d'information routière aux usagers .....	- 37 -
2.1. Introduction .....	- 37 -
2.2. Supports d'information routière.....	- 38 -
2.3. Contenus d'information routière.....	- 47 -
2.4. Croisement des contenus et des dispositifs .....	- 56 -
2.5. Conclusion du chapitre.....	- 58 -
Chapitre 3. Information routière et exploitation du trafic .....	- 59 -
3.1. Introduction .....	- 59 -
3.2. Réseau routier .....	- 60 -
3.3. Les mesures d'exploitation .....	- 72 -
3.4. Recueillement de données.....	- 90 -
3.5. Traitement de données.....	- 99 -
3.6. Conclusion du chapitre.....	- 107 -
Partie II. Analyses bibliographiques .....	- 109 -
Chapitre 4. Comportements des usagers : évidences empiriques .....	- 113 -
4.1. Introduction .....	- 113 -
4.2. Champs d'analyse bibliographique .....	- 114 -
4.3. Synthèse des concepts .....	- 116 -
4.4. Caractères et comportements individuels.....	- 124 -
4.5. Réseau routier et offre de l'information.....	- 129 -
4.6. Conclusion du chapitre.....	- 131 -
Chapitre 5. Modèles de choix d'itinéraire et d'affectation du trafic .....	- 133 -
5.1. Introduction .....	- 133 -
5.2. Rappel de modèles comportementaux.....	- 134 -

5.3. Modèles déterministes.....	137 -
5.4. Segmentation de la demande .....	141 -
5.5. Modèles stochastiques.....	143 -
5.6. Modèles stochastiques avancés .....	150 -
5.7. Modèles d'apprentissage .....	161 -
5.8. Conclusion du chapitre .....	163 -
Partie III. Modélisation des effets de l'information routière.....	165 -
Chapitre 6. Effets de l'information routière sur l'équilibre de l'utilisateur.....	169 -
6.1. Introduction.....	169 -
6.2. Formulation des hypothèses .....	174 -
6.3. Analyse d'équilibre du trafic.....	181 -
6.4. Analyse paramétrique et numérique .....	184 -
6.5. Discussions.....	192 -
6.6. Conclusion du chapitre .....	194 -
Chapitre 7. Divers motifs de comportement et optimisation du trafic .....	197 -
7.1. Introduction.....	197 -
7.2. Formulation des hypothèses .....	200 -
7.3. Analyse d'équilibre .....	206 -
7.4. Acteurs et indicateurs.....	209 -
7.5. Sur le motif d'équilibre de l'utilisateur (rappel) .....	213 -
7.6. Sur le motif d'optimum du système .....	215 -
7.7. L'équilibre de l'utilisateur versus l'optimum du système.....	219 -
7.8. Application à la gestion et à l'optimisation du trafic .....	221 -
7.9. Conclusion du chapitre .....	229 -
Partie IV. Gestion du trafic et information aux usagers.....	231 -
Chapitre 8. Tarification de la congestion et information aux usagers .....	235 -
8.1. Introduction.....	235 -
8.2. Formulation des hypothèses .....	239 -
8.3. Stratégie « Sans tarification ».....	244 -
8.4. Stratégie « tarification fixe » .....	247 -
8.5. Stratégie « tarification dynamique ».....	248 -
8.6. Comparaison de différents plans de gestion du trafic .....	250 -
8.7. Conclusion du chapitre .....	253 -
Chapitre 9. Gestion de capacité et information aux usages .....	255 -
9.1. Introduction.....	255 -
9.2. Formulation des hypothèses .....	258 -
9.3. Allocation fixe de capacité.....	264 -
9.4. Allocation dynamique de capacité .....	270 -
9.5. Comparaison des stratégies d'allocation de capacité.....	275 -
9.6. Conclusion du chapitre .....	277 -
Chapitre 10. Conclusion générale.....	279 -
10.1. Récapitulation.....	279 -
10.2. Limites du travail et pistes de développement .....	283 -
Bibliographie.....	289 -
Notation.....	307 -



Liste des publications associées.....	- 309 -
Annexes .....	- 311 -
Annexe 1. Propriété des distributions probabilistes .....	- 311 -
Annexe 2. Formules du chapitre 6 .....	- 313 -
Annexe 3. Formules du chapitre 7 .....	- 321 -
Liste des illustrations.....	- 329 -
Liste des tableaux.....	- 333 -
Table des matières .....	- 335 -



## Chapitre 1. Introduction générale

---

### 1.1.CONTEXTE

#### 1.1.1.La congestion routière de multiples sources

La congestion est un problème économique, politique et environnemental sérieux de la société moderne. De plus, ce problème est particulièrement grave sur les réseaux routiers. Elle donne de multiples conséquences aux différents acteurs concernés. Pour un voyageur individuel, la congestion réduit la qualité de vie en consommant son temps de loisir, augmentant l'anxiété et gaspillant des ressources personnelles. Pour une entreprise, la congestion réduit la productivité des employés, accroît les coûts de transport de marchandises. Pour la société dans son ensemble, la congestion d'une part affecte négativement la qualité de l'environnement en causant la surconsommation de l'énergie puis les émissions des matières polluantes et du bruit et d'autre part dégrade la sécurité routière en causant des stress et des fatigues aux voyageurs.

Selon les causes, la congestion peut être classée en deux catégories : congestion récurrente ou congestion non-récurrente. La congestion récurrente est due à l'insuffisance de l'offre par rapport à la demande dans des conditions normales. Comme le cycle de vie d'une infrastructure est assez long, la capacité nominale d'une section routière, qui est calculée en fonction de l'une projection lors de la conception, pourrait être inférieure à la demande réelle à un moment ultérieur. Même si la capacité conçue satisfait un niveau moyen de la demande, ce qui est le cas typique, la congestion récurrente paraît pendant les périodes de pointe : les périodes de pointe peuvent être les heures de pointe pour un réseau routier/autoroutier urbain/périurbain, les périodes de vacances pour les grands axes de liaison ou d'autres occasions plus spécifiques. La congestion non-récurrente est due aux perturbations sur le réseau qui réduisent éventuellement les capacités comme les incidents, les accidents, les travaux sur la route ou réduisent les vitesses pratiquées par les usagers comme de mauvaises conditions météorologiques, et probablement d'autres événements spéciaux. Certaines perturbations sont prévisibles, par exemple les travaux programmés, d'autres sont moins prévisibles comme de mauvaises conditions météorologiques, voire complètement imprévisibles comme les incidents, les accidents. D'après des rapports de l'OCDE (OCDE, 1998; OCDE, 2002; OCDE, 2007), la part de la congestion non-récurrente dans l'ensemble de la congestion varie en fonction de l'endroit mais elle est toujours dans un ordre de grandeur considérable, en particulier pour les grandes agglomérations.

La congestion récurrente et celle non-récurrente caractérisent la stochasticité du trafic : le temps de voyage pour un déplacement domicile-travail à un lundi matin

peut être différent de celui à un mardi matin ou à un autre lundi matin de la semaine d'après. Le caractère aléatoire provient de multiples sources : d'une part les perturbations exogènes plus ou moins aléatoires présentées dans le paragraphe précédent et d'autre part les fluctuations de la demande. Les fluctuations résident de la variation de la demande par origine-destination ou de la répartition temporelle de la demande. La combinaison des fluctuations de la demande et les perturbations aléatoires rend stochastique l'état du trafic.

### 1.1.2. Système de gestion dynamique du trafic

En réalité, le problème de congestion peut être résolu en deux approches appelées « offre » et « demande ». L'approche « offre » essaie d'améliorer la capacité du système en adaptant l'offre à la demande de déplacement. Inversement, la proche « demande » essaie de mieux maîtriser la demande de déplacement (Tab. 1–1 ).

	Approche « Offre »	Approche « Demande »
Echelle de temps		
Long terme	Changer la structure du système de transport	Changer la structure spatiale et l'usage du sol
Moyen terme	Elargir des capacités locales de l'infrastructure	Changer la structure de la demande
Court terme	Améliorer l'efficacité de l'exploitation du trafic	Optimiser la répartition spatio-temporelle de la demande

**Tab. 1–1 : Les méthodes de lutte contre la congestion classées par approche et par échelle de temps**

Les mesures de long terme ne peuvent pas résoudre immédiatement les problèmes. Elles sont souvent confrontées à multiples contraintes. Et elles ne sont pas capables de réagir à la stochasticité et à la variation de la demande. Il est communément reconnu que la construction d'infrastructure nouvelle, qui est politiquement, financièrement et écologiquement contrainte, n'est pas le seul remède à la congestion. En outre, de nouvelles infrastructures vont entraîner une demande plus forte, ce qui pourrait diminuer le profit de l'augmentation de capacité, voire rendre plus congestionné le réseau. Aujourd'hui les mesures de lutte contre la congestion routière sont généralement basées sur un meilleur usage de l'infrastructure par une meilleure gestion de l'offre et de la demande. En profitant des progrès en technologies de communication et d'information et de traitement de données, les modules de recueil et de traitement de données dans un système de gestion du trafic informatisé deviennent capables de fournir une connaissance précise, en temps réel sur l'état du trafic, en s'appuyant sur laquelle l'opérateur routier peut anticiper et appliquer des mesures permettant de réduire les impacts négatifs des fluctuations et des stochasticités décrites

dans le paragraphe précédent. Selon l'approche utilisée, les mesures de gestion du trafic sont divisées en deux catégories : les mesures de l'approche « *offre* », telles que la régulation par feux à intersection, le contrôle d'accès autoroutier, la régulation de vitesse, l'allocation de voies, etc. interviennent directement sur l'offre du réseau afin de mieux adapter l'offre à la demande ; les mesures de l'approche « *demande* », telle que la tarification, l'information aux usagers, etc., visent à modifier le niveau et la structure de la demande en influençant les choix de déplacement des usagers (déplacement ou non, choix de destination, choix modal, choix d'horaire, choix d'itinéraire, etc.).

En France, nous avons constaté de grands efforts de l'Etat et des collectivités dans l'investissement importants sur le développement des systèmes de gestion du trafic au cours de deux dernières décennies afin de lutter contre la congestion, de rendre la route un meilleur confort et une meilleure sécurité. Aujourd'hui, non seulement les réseaux autoroutiers concédés ASFA (COFIROUTE, SAPN, SANEF, APRR, etc.) mais aussi la partie du réseau magistral gérée par l'Etat et les voies rapides urbaines dans les agglomérations, par exemple SIRIUS en Ile de France, CORALY à Grand Lyon, MARIUS à Marseille, sont équipés en système de gestion dynamique du trafic (Chapulut, 2004).

### **1.1.3. Service d'information du trafic aux usagers**

Chacun des usagers routiers prend de décision concernant ses déplacements (destination, mode, horaire de départ, itinéraire) en fonction de sa connaissance sur le réseau et sur l'état du trafic, qui est formée par des informations provenant de différentes sources, via de différents supports : la connaissance propre de l'utilisateur lors de ses déplacements précédents, lors des échanges avec d'autres automobilistes, la télévision, la radio, des panneaux à messages variables (PMV) ou son dispositif personnel dédié pour la réception de l'information du trafic.

Sans compter les cartes routières et autoroutières en papier, qui constituent d'ailleurs d'un véritable support d'information routière, l'histoire du service d'information routière au sens de gestion du trafic en France a débuté des années 1970 avec le livret routier et le calendrier du trafic Bijon-Futé pour un rôle complémentaire à la signalisation implantée sur le long des routes et des autoroutes. Ils informent les usagers routiers sur les périodes de circulation difficile, notamment pendant les vacances. Aujourd'hui, le service d'information du trafic aux usagers est une composante indispensable d'un système de gestion dynamique du trafic. La popularité des appareils électroniques facilite l'accès à l'information, même à l'information dynamique. Il s'agit d'un domaine en fort développement. En plus, le marché de l'information du trafic aux usagers est également ouvert aux opérateurs privés par le Schéma Directeur du Système de l'Information Routière en 2000 avec de nombreux fournisseurs tels que Michelin, TomTom avec les système de guidage nomade et Médiamobile avec le service

information du trafic V-traffic. Ces fournisseurs d'information routière utilisent de l'information partagée par les opérateurs routiers et/ou de l'information collectée par eux même, par exemple les véhicules traceurs de Médiamobile en Ile de France.

Le service d'information du trafic aux usagers est une composante spécifique du système de gestion du trafic car il joue le double rôle. D'une part, l'information aux usagers joue un rôle complémentaire à la gestion du trafic en informant les usagers sur l'existence d'une mesure de gestion du trafic déployée : elle ne donne pas d'effet au niveau local car mais elle influence probablement les choix des usagers au niveau réseau. L'information routière est également un outil de gestion du trafic : elle contribue à mieux répartir la demande dans le temps et dans l'espace en guidant les usagers dans leurs choix de déplacement.

#### **1.1.4. Les acteurs concernés**

Les nombreux acteurs du domaine « *information du trafic aux usagers* » peuvent être divisé en trois groupes : les usagers routiers, les fournisseurs d'information du trafic et la collectivité. Chacun a son intérêt et sa propre stratégie.

Pour un usager routier, l'information routière lui procure un profit individuel en lui permettant d'optimiser ses choix. En cas de perturbation, l'information dynamique permet à l'usager de réagir, réduire son exposition à la perturbation puis réduire son coût individuel par rapport à une décision sans information. Sur l'ensemble de la demande, il est nécessaire de distinguer également les usagers informés et les usagers non-informés. La réaction de l'usager informé peut contribue potentiellement à alléger la congestion sur l'itinéraire perturbé et rend du profit aux autres usagers routiers.

La collectivité, y compris l'état, les collectivités locales ou les opérateurs routiers qui utilisent le service d'information du trafic aux usagers comme un outil d'optimisation, du trafic : l'information de régulation et d'orientation induit des effets collectifs, susceptibles de réduire considérablement l'ampleur et la gravité d'une congestion.

Afin d'attirer des usagers, les fournisseurs d'information du trafic tentent de fabriquer de l'information crédible qui rend la meilleure valeur aux usagers. Dans le cas où il y a plusieurs fournisseurs d'information sur le même réseau, il est intéressant de la stratégie utilisée par chaque fournisseur pour être compétitif par rapport les autres.

## **1.2.PROBLEMATIQUE**

### **1.2.1.Comportements des usagers face à l'information**

La compréhension sur les comportements des usagers est toujours un élément clés pour la planification du réseau et l'exploitation du trafic puisque les comportements de choix des usagers conditionnent l'affectation du trafic et puis les conditions du trafic sur un réseau. Les comportements sont difficiles à observer car la procédure de choix des usagers n'est pas un phénomène visible. La méthode habituellement utilisée est enquête questionnaire qui est souvent coûteuse et porte des biais car les usagers ne s'expriment pas toujours bien leurs besoins, leur raisonnement de choix, etc. En présence de l'information du trafic aux usagers, cette procédure devient encore plus compliquée car la réaction d'un usager face à l'information semble dépendre de plusieurs facteurs : le niveau d'accessibilité à l'information, l'expérience capitalisée lors de ses précédents déplacements, les caractéristiques du trafic, son contexte de déplacement, les mesures de gestion du trafic appliqué et spécifiquement la crédibilité et la stratégie de diffusion adoptée (en dehors le problème de densité spatio-temporelle et de qualité de données). En plus, l'information du trafic affecte plusieurs éléments de la procédure de décision d'un usager : choix de déplacement, choix modal, choix de destination, choix d'horaire de départ et choix d'itinéraire.

Le rapport entre la compréhension des comportements et la crédibilité de l'information est parfois un « *paradoxe de l'œuf et de la poule* » car l'anticipation des réactions des usagers est la condition cruciale pour que l'information diffusée soit crédible. En revanche, sans la crédibilité de l'information, il est très difficile d'envisager les réactions des usagers.

### **1.2.2.Multiplicité des interactions dans un système complexe**

Dans un système de gestion du trafic, le service d'information aux usagers joue un double rôle. D'une part, le déploiement et l'application de certaines mesures, telles que le contrôle d'accès, la régulation dynamique de vitesse, le péage dynamique ou HOT lane, doit être informé aux usagers. D'autre part, l'information du trafic aux usagers est également utilisée comme un outil de gestion du trafic.

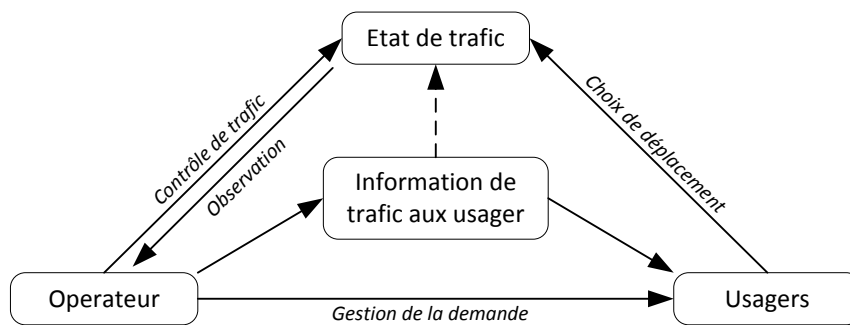


Fig. 1-1 : Multiplicité des interactions entre l'information de trafic et d'autres composantes

Comme le service d'information de trafic aux usagers est une composante dans l'ensemble des mesures d'exploitation du trafic déployées sur un réseau, son mise en œuvre doit prendre en compte un grand nombre d'interactions qui sont illustré de manière synthétique dans en Fig. 1-1

(i) **Interaction avec les usagers** : A priori, les usagers utilisent de l'information de trafic pour prendre de décision concernant leur déplacement, notamment sur un réseau portant des variations et des perturbations aléatoires où l'expérience individuelle n'est pas suffisante pour prendre une décision. Néanmoins la façon dont un usager réagit à l'information dépend de plusieurs facteurs : la crédibilité et l'utilité de l'information qui sont lié à la procédure de production et de diffusion de l'information, le contexte du déplacement, les préférences individuelles de l'utilisateur. Une fois que l'information est utilisée par les usagers pour leur choix de déplacement, l'information affecte de manière indirecte l'état du trafic qui est sa source d'alimentation via les équipements de mesure du trafic.

(ii) **Interaction avec l'opérateur** : comme l'information de trafic aux usagers est une des mesures d'exploitation du trafic utilisées par l'opérateur. La diffusion de l'information de trafic peut affecter l'état du trafic qui conditionne les données d'entrée d'autres mesures de gestion du trafic. Réciproquement, les mesures de gestion du trafic, telles que les feux à intersection, le contrôle d'accès, le contrôle de vitesse, l'allocation variable de voie, la tarification, etc. modifient l'état de trafic. L'information devient non-crédible si elle ne tient pas en compte les effets des mesures d'exploitation. Il nécessite donc d'une certaine synergie entre les différentes mesures de gestion du trafic.

Cette problématique devient encore plus complexe dans le cas où l'exploitation du réseau routier n'est pas le seul fournisseur d'information routière.



### **1.2.3.Modèle économique des services d'information routière**

Pour la collectivité, le service d'information du trafic aux usagers ainsi que d'autres mesures de gestion du trafic exige d'un niveau d'équipement important sur le réseau : stations de recueillement de données, infrastructure de télécommunication, infrastructure informatique pour le traitement de données, les équipements intervenant (panneau à messages variables, feux à intersection, etc.).

Pour un usager individuel, il est probable qu'il doit payer d'abord pour le support terminal et puis pour la réception des informations contextualisées et personnalisées.

La question essentielle posée est donc l'information dynamique est-elle nécessaire pour l'utilisateur et pour la collectivité ? Quel gain peut-on retirer de la diffusion et de l'usage de l'information routière ?

Suivant cette dernière, de nombreuses autres questions se posent : quel modèle commercial pour le service d'information routière ? Est-il nécessaire une subvention de l'état ? La plupart des fournisseurs en information routière suppose que les informations les plus pertinentes et les plus actualisées devraient être diffusées à tous les usagers de manière d'in-discrimination ? Il est possible de diffuser de l'information aux usagers d'une manière qu'elle contribue à réduire la congestion ?

Il semble que les outils existants et les méthodes traditionnelles ne permettent pas d'effectuer des évaluations pertinentes car ils ne sont pas capables de capturer les phénomènes et les interactions essentielles dans le système routier liés à l'information routière. Lors d'un séminaire de l'ATEC-ITS France, les chercheurs et les praticiens ont évoqué le besoin méthodologique pour mieux discerner cette problématique (Nguyen, 2007). Cela s'exprime la nécessité d'un modèle pertinent, qui est capable de prendre en compte la complexité de la diffusion de l'information routière, la réalité sur un réseau routier : aléas, perturbation, les comportements typiques des voyageurs, et aussi les stratégies, les mesures d'exploitations opérées par l'exploitant.

## **1.3.OBJECTIFS**

Dans le cadre de ce travail, nous fixons deux objectifs principaux suivants :

### **1.3.1.Conception d'un modèle adressé à l'analyse de l'information routière**

Au niveau de conception, notre objectif de concevoir un cadre de modélisation permettant d'analyser la complexité de la diffusion de l'information dynamique

et la multiplicité des interactions liées. Le modèle devra prendre en compte les éléments suivants :

(v) **Le phénomène de congestion** : la congestion est un phénomène physique essentiel du transport routier selon lequel une concentration accrue de véhicule, par leurs gênes mutuelles, dégrade la vitesse de chacun.

(vi) **Les perturbations exogènes** : les perturbations exogènes est une autre particularité du transport routier. Le transport peut être perturbé par des facteurs exogènes plus ou moins aléatoires tels qu'incidents, accidents, conditions météorologiques difficiles, chantier sur la route, etc.

(vii) **La présence de l'information dynamique** : le service d'information dynamique du trafic influence le choix de déplacement de ses usagers en améliorant leur connaissance de l'état du trafic ou en leur donnant des conseils de guidage. Bien entendu, l'information dynamique devra être liée aux perturbations, un des facteurs principaux qui engendrent la dynamique des conditions de circulation – la raison pour laquelle le service d'information dynamique existe.

(viii) **Comportement des usagers** : traditionnellement, la décision de choix de déplacement est supposée de s'effectuer par un raisonnement économique. Il faudra pourtant distinguer les comportements de choix des usagers en fonction de leur niveau d'accès à l'information dynamique.

(ix) **D'autres mesures d'exploitation sur le réseau** : *a priori*, le service d'information et d'autres mesures d'exploitation sont mutuellement dépendants car les mesures d'exploitation affectent la crédibilité de l'information et la diffusion de l'information, en revanche, conditionne le paramétrage des mesures appliquées. Il faudra intégrer également de différentes stratégies adoptées par l'exploitant.

### 1.3.2. Application analytique pour un cas d'école

Au niveau d'application, bien que nous concevions un cadre de modélisation généralisable à un grand réseau, nous nous limitons nos applications, dans le cadre de cette thèse de doctorat, à un cas d'école relativement simple afin d'éviter des biais numériques constatés dans nombreux articles de la littérature et d'avoir des conclusions pertinentes.

## 1.4. METHODOLOGIE

Comme avoir évoqué en §1.3, le système routier que nous modéliserons comporte plusieurs éléments, phénomènes ainsi que les interactions entre eux. Pour décrire explicitement la méthodologie utilisée, nous allons identifier les natures de notre modélisation en §1.4.1 et puis le jeu d'hypothèses de simplification en §1.4.2.

### **1.4.1. Les trois natures du modèle**

La modélisation mathématique, qui combine des aspects relevant de plusieurs disciplines, s'inscrit dans un domaine scientifique et technique de modélisation pour l'ingénierie. Selon les éléments et les phénomènes pris en compte dans le modèle, notre modélisation réside à trois natures dans lesquelles la nature physique du phénomène de congestion et la nature économique des comportements de choix sont conventionnelles. Par contre, la nature probabiliste des perturbations est une spécificité de notre travail.

#### **Nature physique**

La congestion est un phénomène physique spécifique du trafic routier selon lequel une concentration accrue des véhicules, par le jeu de leurs gênes mutuelles, dégrade la vitesse de chacun et la qualité de service pour tous.

Ce phénomène a été abondamment étudié au niveau local d'une section routière : on distingue classiquement un régime saturé, dans lequel les véhicules forment une file d'attente sans « trous » dans le trafic, file dont l'écoulement est principalement déterminé par les conditions de capacité en aval ; et un régime non saturé, appelé fluide même s'il comporte des interactions entre les véhicules. Par l'approche statique, le problème de congestion est modélisé par une fonction croissante du temps de parcours par rapport au débit.

#### **Nature économique**

Sur un réseau routier, l'utilisateur dispose souvent plusieurs options pour réaliser un déplacement donné. Il doit donc choisir une option qui lui convient parmi les options disponibles. Dans la littérature, les études empiriques en termes psychologique et cognitive ont montré que la procédure de décision du choix de déplacement est complexe : pour trouver la meilleure option, l'utilisateur compare les options qu'il connaît par plusieurs attributs en combinant à son contexte et à ses préférences.

Quant à la modélisation, le choix de déplacement des usagers est modélisé en s'appuyant le raisonnement économique du décideur : le décideur choisit l'option la moins coûteuse pour lui en basant sur la notion du coût généralisé. Bien entendu, cette décision économique dépend de la formation du coût et la connaissance dont le décideur dispose des options de choix.

Pour notre modèle, nous modélisons le comportement de choix des usagers par leur raisonnement économique en distinguant la connaissance des usagers en fonction de la classe qu'ils appartiennent.

Par ailleurs, les comportements de l'exploitant dans l'application des mesures d'exploitation, malgré des contraintes techniques, sont également des comportements économiques.

### **La nature probabiliste**

Les conditions de circulation subissent souvent des perturbations exogènes : la source d'une perturbation peut être une augmentation ponctuelle de la demande, une fermeture de voies pour un chantier, une condition météorologique difficile gênant à la circulation, un incident ou un accident. Sauf le chantier routier qui est souvent programmé à l'avance, stochasticité est le caractère commun des perturbations. Les études empiriques dans la littérature ont montré que les temps de parcours d'un itinéraire sont souvent distribués de manière plus ou moins aléatoire. La variation des temps de parcours sur un itinéraire sont souvent représentée par une variable aléatoire.

Ce travail ne cherche pas à modéliser un cas de perturbation particulier mais une structure probabiliste des perturbations. Chaque cas de perturbation, avec son ampleur, est associé à une probabilité.

### **1.4.2. Jeu d'hypothèses simple mais assez réaliste**

Afin de rendre totalement analytique de nos traitement dans la modélisation d'un système de telle complexité, nous retenons un jeu des hypothèses simplificatrices mais réalistes : la simplification assure que la modélisation soit traitable analytiquement et le jeu des hypothèses devra être réaliste pour capturer les éléments et les phénomènes essentiels et pour tracer les effets des politiques d'exploitation.

### **La représentation de l'offre**

Nous considérons un réseau routier qui se compose des arcs et des nœuds. Notre application se limite à un cas d'école : un réseau composé de deux routes parallèles desservant une relation entre une origine et une destination.

A priori, les itinéraires (les options de choix) se composent de sections de route. Chaque section de route supporte une quantité de trafic qui en induit un temps de parcours selon le phénomène de congestion. Pour l'instance, nous retenons une fonction linéaire pour modéliser la relation débit-temps de parcours.

Le temps de parcours de chaque itinéraire est soumis également aux perturbations exogènes. Nous modélisons les effets des perturbations sur les temps de parcours de chaque itinéraire par une variable aléatoire qui est additive à la fonction débit-temps.

## **La représentation de la demande**

Nous considérons une population fixe des usagers souhaitant de se déplacer de l'origine vers la destination et ils ont la possibilité de choisir leur itinéraire parmi les deux routes desservant cette relation origine-destination. Tous les usagers ont le même comportement économique rationnel : chercher à minimiser le coût de déplacement qui est réduit au temps de parcours et éventuellement le péage. Ainsi ils sont différenciés par leur manière d'estimer les temps de parcours qui résulte de leur niveau d'accès à l'information dynamique : les usagers de la classe informée connaissent parfaitement les temps de parcours de la circonstance pendant que les usagers de la classe non-informée ne connaissent que les valeurs moyennes grâce à la leur expérience.

## **L'équilibre du trafic**

Nous considérons deux échelles d'équilibre : d'une part, l'équilibre instantané à chaque circonstance est établi par les choix d'itinéraire des usagers informés et d'autre part l'équilibre stationnaire de long terme est établi également par les choix d'itinéraire des usagers non-informés.

## **1.5. CONTENU DU MEMOIRE**

En dehors de l'Introduction générale dans laquelle nous précisons le contexte de ce travail, nos objectifs, notre méthodologie et la Conclusion générale dans laquelle nous récapitulons les résultats obtenus ainsi que proposons des pistes de développement, ce mémoire se compose de quatre parties, chacune comprend deux chapitres. La structure du mémoire est illustrée en Fig. 1-2 : la Partie I consacrera au développement et à l'analyse de la problématique ; la Partie II consacrera à une revue de littérature sur les éléments de base : les comportements de choix des usagers et les modèles de choix ; dans la Partie III, nous développerons notre jeu d'hypothèses pour la modélisation, nous appliquerons ce jeu d'hypothèse à un cas d'école et nous élargirons le jeu d'hypothèses pour la prise en compte des différents contenus coopératifs ; la partie IV sera réservée à la modélisation des interactions entre la diffusion de l'information et d'autres mesures de gestion du trafic. Malgré de nos volumineuses revues de littérature présentées dans la Partie II, nous développerons pour chacun des quatre derniers chapitres une revue bibliographique qui correspond à la spécificité de chacun.

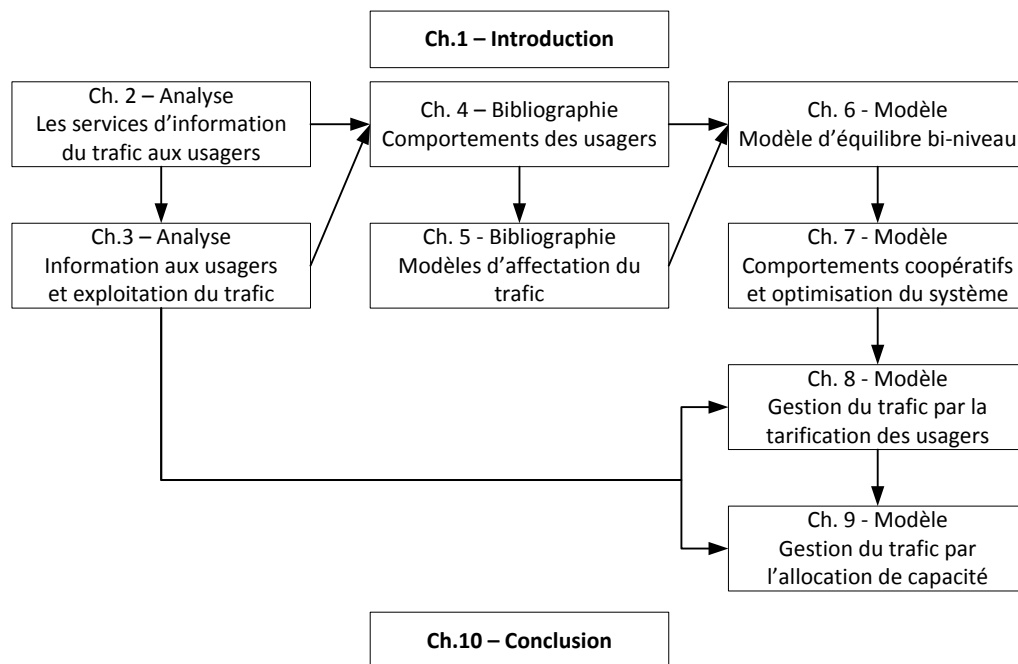


Fig. 1-2 : La structure du mémoire

### 1.5.1.Développement du sujet

Pour l'objectif de déterminer les problématiques liées à l'information routière et identifier les éléments pris en compte dans notre modélisation, cette partie comprend deux chapitre suivants :

- Le Chapitre 2 fournit une description complète et une analyse sur l'offre de l'information routière, à la fois au niveau de dispositif et au niveau de contenu d'information. Il établit également le lien entre la disposition d'un équipement spécifique et l'accessibilité à certain type d'information.
- Le Chapitre 3 développe le rapport entre l'information routière et d'autres actions d'exploitation du trafic dans un système où l'information routière joue un double rôle : le rôle complémentaire en informant les usagers de l'application des mesures de gestion ou le rôle indépendant comme une mesure de gestion de la demande.

### 1.5.2.Revues de littérature

- Le Chapitre 4 synthétise, par une revue de littérature, les éléments empiriques concernant les comportements des usagers, y compris les comportements de choix (itinéraire, horaire), les attributs d'une option, les préférences de choix, les réactions face à l'absence ou à la présence de l'information. Cette synthèse nous permet de formuler les hypothèses simples mais suffisamment réalistes.

- Le Chapitre 5 fournit une revue de littérature sur les modèles de choix d'itinéraire existants. Ce chapitre ne s'intéresse qu'aux modèles élémentaires en excluant l'aspect algorithmique du problème d'affectation. Les travaux liés à l'information du trafic ne sont pas présentés ici.

### **1.5.3.Modélisation des effets de l'information**

- Dans le chapitre 6, nous formulons nos hypothèses de base concernant l'offre, la demande et l'équilibre du trafic et puis nous appliquons ce jeu d'hypothèses à un cas d'école.
- Dans le Chapitre 7, nous élargissons le cadre d'hypothèses pour plusieurs motifs de comportements coopératifs. Cela permet de définir l'optimum du système et d'analyser de différentes stratégies d'information en matière de contenu et de diffusion.

### **1.5.4.Modélisation conjointe de l'information routière et des mesures d'exploitation**

- Dans le Chapitre 8, nous modélisons les interactions entre l'information routière et une autre mesure d'exploitation de l'approche « demande », la tarification de la congestion. Deux stratégies de tarification seront traitées : tarif fixe et tarif dynamique.
- Dans le chapitre 9, nous modélisons l'interaction entre l'information routière et une mesure d'exploitation de l'approche « offre », l'allocation de capacité. Comme le Chapitre 8, nous traitons aussi deux stratégies d'allocation de capacité : statique ou dynamique.





**Partie I. Service d'information dans un  
système routier**



Nous allons essayer dans cette première partie d'expliquer plus en détail le problème que nous souhaitons de traiter, à savoir prendre en compte les effets de l'information routière aux usagers en présence de la congestion récurrentes et des perturbations ainsi que d'autres actions d'exploitation du trafic.

Avant de chercher à modéliser un tel système complexe, nous allons le décrire plus précisément et nous verront comment cette description peut être modélisée. Nous avons réparé cette partie en deux chapitres qui s'intéresse chacun à un aspect particulier de notre sujet.

Dans un premier chapitre, nous nous intéressons aux services d'information routière aux usagers. Chaque service d'information routière sera analysé en deux aspects : au niveau désagrégué, les composantes d'un message d'information diffusé et au niveau agrégé, le contenu de l'information diffusé qui aide l'utilisateur pour sa décision de déplacement. Un croisement des dispositifs et des contenus nous permet de voir plus précisément et plus clairement les conditions d'accès à chaque service.

Dans un deuxième temps, nous nous intéressons au système d'exploitation auquel service d'information routière fait partie. Nous décrivons les réseaux routiers, leur typologies, leur particularités (en particulier le phénomène de congestion et les événements perturbants au trafic) ainsi que leur besoin en exploitation du trafic. Puis, nous décrivons les mesures de gestion du trafic routier, chacun avec ses variables d'actions, conditions d'application. En suite, nous analysons la procédure de recueillement et de traitement de données qui alimentent les mesures de gestion du trafic et engagent la diffusion de l'information aux usagers. Notre analyse va montrer ainsi les rapports entre le service d'information routière sur un réseau et les mesures de gestion du trafic éventuellement appliquées.



## **Chapitre 2. Services d'information routière aux usagers**

---

### **2.1.INTRODUCTION**

#### **2.1.1.Contexte**

En France, l'histoire de l'information routière a commencé dès le début du vingtième siècle par des panneaux de signalisation en béton armé et puis des cartes routières du pionnier Michelin (Duhamel, 1994) et (Duhamel et Nouvier, 2000). Grâce à l'avancement de l'informatique et de la télécommunication, le système d'information routière est devenu une composante indispensable d'un système d'exploitation du trafic routier d'aujourd'hui. Le Schéma Directeur du Système d'Information Routière (Sétra, 2000) a précisé que l'utilisation du système d'information routière est pour l'objectif *« de capitaliser la connaissance du patrimoine routier et de la partager entre tous les acteurs impliqués dans la gestion et l'exploitation des réseaux »*.

L'information routière concerne les deux côtés « offre » et « demande ». Au côté d'offre, l'information routière est un des éléments cruciaux au maître d'ouvrages pour définir et évaluer les politiques d'exploitation routière, quelque soit en matière d'investissement, d'exploitation ou d'entretien. Cela est s'applique aussi bien pour les exploitants routiers publics que les concessionnaires autoroutiers. Au côté « demande », l'information routière est indispensable aux usagers pour la réalisation des déplacements. L'information aux voyageurs est définie comme *« l'ensemble de l'information concernant le réseau et le trafic pour faciliter la planification de déplacement et puis le déplacement »*, (PIARC, 2009).

#### **2.1.2.Objectif**

Dans ce chapitre nous établirons une description et une analyse sur l'ensemble des services d'information du trafic aux usagers. La description ne se limite pas aux services d'information routière existant, elle inclut également des services et des besoins qui pourront potentiellement se développer. Nous nous intéressons également à analyser les contenus diffusés et les supports (équipements) utilisés par chaque type d'information routière.

#### **2.1.3.Contenu**

Nous commençons ce chapitre par décrire les services d'information routière aux usagers (§2.2). En suite, en nous appuyant sur les détails des services décrits, nous effectuons une analyse sur les contenus de l'information routière aux usagers (§2.3) en deux niveaux : désagrégation – composantes d'information (§2.3.1) et agrégation – contenus d'information (§2.3.2). En fin, un croisement

support-contenu nous permet de comprendre les conditions d'accès à l'information (§2.4).

## **2.2.SUPPORTS D'INFORMATION ROUTIERE**

Si « information routière aux voyageurs » est un sujet bien récemment abordé, les services d'information aux voyageurs ont été développés dès (ou bien avant) la naissance de l'automobile automobile, par exemple : carte routière et panneaux de signalisation.

Les dernières décennies sont marquées par une évolution forte de l'usage automobile, puis de la congestion. Heureusement, l'avancement des nouvelles technologies de communication, de collecte et de traitement des données encourage les efforts de la lutte contre la congestion. Aujourd'hui, grâce à leur maturité et leur variété, les services d'information aux voyageurs sont considérés comme des éléments indispensables dans l'ensemble des mesures d'exploitation du trafic.

Les dispositifs d'information routière sont classés de diverses manières : manuel/électronique, statique/dynamique, en route/hors route, etc. Nous proposons de les regrouper en quatre catégories : supports papier, signalisation, dispositifs nomades, et médias

### **2.2.1.Supports papiers**

#### **Carte routière**

Un des plus anciens supports en information routière, carte routière est une représentation cartographique de l'espace, imprimé sur papier. Elle représente primordialement la topologie du réseau routier, y compris les noms, la localisation des lieux et les relations entre eux, de manière fine ou grossière. Une carte routière contient normalement des préférences, par exemple le nom de route, type de route, le relief de terrain, la végétation, la présence des services. La richesse de l'information présentée sur une carte dépend de son type, son format et son échelle de présentation.

Bien que l'usage de la carte routière papier reste répandu, l'évolution de la cartographie est marquée par l'apparition de la carte routière électronique se basant sur la technologie GIS (Système d'Information Géographique). La carte électronique est largement utilisée pour diffuser de l'information routière via dispositifs nomades (§2.2.3) ou via divers médias (§2.2.4).

#### **Livret routier**

Nous utilisons le terme « livret routier » pour désigner un type de livres contenant une série de cartes routières en plusieurs échelles et en plus un

certain nombre d'informations utiles à la conduite, au déplacement ainsi que au voyage.

Si une carte routière se focalise essentiellement sur la représentation topologique du réseau avec quelques détails en caractéristiques physiques, un livret routier peut offrir au usager des renseignements riches sur les destinations, sur les itinéraire S/itinéraire Bis, les services utiles sur le long de la route : restaurant, hôtel, aire de services, etc. et/ou parfois une fiche de prévision du trafic du calendrier Bison Futé (cf. §3.5). Citons quelques livrets routiers populaires : « Atlas France : routier et services utiles » de Michelin (Michelin, 2008), « Conseil et itinéraire Bis » et « Calendrier Trafic routier » de Bison Futé.

L'atlas de Michelin est un ensemble de cartes routières, qui représente le réseau à plusieurs échelles : du niveau panoramique au niveau détaillé pour chaque localisation. Sur les plans, une information copieuse sur le réseau et les services routiers est affichée : distance kilométrique de chaque route, types routiers, péages, restaurants, hôtels, aires de repos, etc.

Le calendrier Bison Futé est un support papier de communication entre le centre de l'information routière et les usagers de la route dont l'objectif est d'informer des difficultés de circulation prévisibles pour les inciter à reporter le jour de leur voyage ou l'heure de départ en proposant des périodes et des itinéraires moins chargés.

En France, les fournisseurs majeurs de ces services sont les éditeurs traditionnels Michelin, IGN (Institut Géographique National), Blay Foldex, etc.

### **2.2.2.Signalisation**

La signalisation routière est composée de panneaux, les feux, le marquage, le balisage et le bornage. Elle permet d'informer l'usager des règles en vigueur et de se localiser et l'orienter dans ses déplacements. En se composant de huit parties, l'Instruction Interministérielle de la Signalisation et Sécurité Routières (IISSR), issue de l'arrêté de l'Arrêté du 24 novembre 1967 relatif à la signalisation des routes et autoroutes, est de définir toutes les règles d'implantation de tous les signaux sur le domaine public routier.

L'IISSR vient d'être modifié par l'arrêté du 11 juin 2008 (Journal Officiel du 10 juillet 2008) pour adapter la signalisation aux nouveaux modes d'exploitation du trafic, tels que l'affectation dynamique des voies, signalisation des pistes cyclables, etc.

Cette section abordera essentiellement des panneaux et des feux qui jouent le rôle majeur dans la signalisation routière dans selon la catégorisation proposée dans l'IISSR.

## **Signalisation de réglementation**

Elle notifie les usagers de la route des obligations, limitations ou interdictions spéciales qu'ils doivent observer : les panneaux de priorité annoncent des caractères prioritaires ou non prioritaires de la route à une intersection ; les panneaux d'interdiction annoncent des interdictions ou des limitations ; les panneaux d'obligation présentent des directions que le voyageur est obligé de suivre.

Les panneaux de ce type de signalisation sont sous formes diverses : les panneaux d'interdiction sont sous forme circulaire à fond blanc, couronne et barre d'interdiction rouges, symbole et inscription noirs et rouges ; les panneaux d'obligation sont sous forme circulaire à fond bleu, bordure, symbole et inscriptions blanches ; etc. Les panneaux de réglementation sont implantés au voisinage immédiat de l'endroit où la prescription commence à s'imposer et doivent être répétés après chaque intersection

## **Signalisation de danger**

Elle prévient les voyageurs des obstacles qu'ils vont probablement rencontrer et éveillent sa vigilance avec un éventuel ralentissement adapté à la mesure signalée. Les obstacles signalés sont soit relatifs à la structure, à l'état et à l'environnement de la route ; soit à des dispositifs et des circonstances locales ; soit aux conditions de circulation des véhicules et des piétons.

Les panneaux de danger sont sous forme triangulaire équilatérale, dont un côté est horizontal et dont le sommet opposé est en haut. Leur fond est blanc ; leur bordure est rouge ; leurs symboles, inscriptions sont en noir.

L'implantation des panneaux se fait à une distance assurant le temps nécessaire pour la perception et la réaction. L'espacement entre le panneau et la zone signalé est de 50 m en agglomération et de 100 – 200 m hors agglomération.

## **Signalisation d'indication et des services**

Elle porte à la connaissance des voyageurs des informations utiles à la conduite ou des informations relatives aux activités locales. Ces panneaux signalent des indications relatives à l'usage et à la praticabilité des voies, annoncent certains aménagements ; la proximité ou la présence de services ou d'installations ; des connaissances sur les activités locales et les lieux traversés par la route.

Les signaux d'indication sont normalement rectangulaires. Panneaux type C donnant des informations utiles à conduite sont en fond bleu avec des inscriptions et symboles majoritairement en blanc, parfois en noir et rouge. Panneaux type CE indiquant des services sont en fond blanc, bordure bleu avec des inscriptions et symboles majoritairement en noir.



## Signalisation de direction

Elle guide les usagers de la route au cours de leur déplacement pour qu'ils puissent trouver la destination souhaitée. En général, un panneau de direction porte la connaissance sur les directions relatives au sens de circulation avec le nom de la route à suivre, les destinations principales (nom de lieu, distance kilométrique) sur la direction présentée ; la distance kilométrique parcourue ; la direction, la voie à suivre ; la proximité d'un échangeur ou d'une bifurcation autoroutière.

Les panneaux directionnels sont normalement rectangulaires ; toutefois, les signaux de direction peuvent avoir la forme d'un rectangle allongé à grand côté horizontal et se terminant par une pointe de flèche.

Les couleurs du fond et la taille du symbole et de l'inscription indiquent l'importance de la direction (route ou autoroute), et de la cible : les couleurs de fond utilisées en signalisation de direction sont définies en fonction soit de l'importance des mentions desservies, soit du caractère temporaire des indications ; les couleurs de fond utilisées pour les cartouches indiquant les routes et autoroutes sont définies par le fonctionnement de la route ; pour la taille des noms de lieu ou des flèches : plus le lieu ou la direction sont importants, plus la taille est grande.

L'implantation de la signalisation directionnelle doit assurer la visibilité, la compréhensibilité et la continuité. Tous les panneaux de direction doit être conforme au schéma directeur de signalisation de la zone dans lequel il est implanté :

- En milieu campagne, le schéma directeur de signalisation départemental
- En milieu urbain, le schéma directeur de signalisation communal ou intercommunal. Ces schémas doivent eux-mêmes être cohérents avec le schéma directeur de la signalisation.

Le schéma directeur d'une zone détermine les liaisons entre pôles à signaler ainsi que leur importance et leur éloignement. L'élaboration du schéma commence par une étude de pôles : les pôles (aussi des zones génératrices du trafic) sont identifiés et classés en fonction de leur taille : population, activité de commerce, etc. Puis, les liaisons et l'importance des liaisons sont établies en fonction des deux pôles liés. En fin, le parcours emprunté par une liaison est signalé par le principe d'unicité, c'est-à-dire un seul parcours, correspondant à celui utilisé par la majorité des véhicules de la catégorie concernée du pôle de départ vers le pôle d'arrivée, est signalé :

- En rase campagne, le choix se porte sur l'itinéraire le plus rapide
- En milieu urbain le choix se fait en fonction du plan de circulation.

## **Signalisation temporaire**

Avertir et guider l'usager, afin d'assurer sa sécurité et celle du personnel et de favoriser la fluidité de la circulation dans le cas où la route est affectées par des obstacles ou dangers dont l'existence est temporaire.

La signalisation temporaire peut utiliser des panneaux, des feux, des balises, les bornes, ou le marquage sur chaussées qui ont pour but de signaler des dangers, des directions ou de guider ou séparer la circulation du trafic. Dans la majorité des cas, le fond des panneaux est jaune

## **Feux de circulation**

Ayant pour but de d'assurer la sécurité des piétons et des usagers des véhicules et d'améliorer la fluidité de la circulation, les feux de circulation sont utilisé dans diverses situations : traditionnellement la gestion du trafic aux intersections, la traversé des piétons, la gestion d'un point de contrôle (péage), l'exploitation par sens uniques alternés d'une section, la protection d'obstacles intermittents ou plus récemment l'affectation dynamique des voies, le contrôle d'accès autoroutier, etc.

Un système de feux fonctionne de manière autonome, en synchronisation automatique avec un système de comptage/détection ou avec le commandement d'un poste de commande de gestion du trafic.

## **Panneau à Messages Variables**

Faisant partie de la signalisation, un panneau à messages variables est défini comme « *panneau de signalisation routière pouvant prendre au moins deux états différents* » (Desnouailles et Nouvier, 2009). Un panneau à messages variables peut être inertes, manœuvré depuis le bord de la route ou dynamique, télécommandé localement ou depuis un poste central de gestion du trafic. La neuvième partie de l'IISR, en cours d'élaboration, sera consacrée à définir des panneaux à messages variables.

Le domaine d'emploi des panneaux à messages variables est parfois le même que celui des panneaux temporaires à message constant : on a recours aux PMV lorsque la pose de la signalisation temporaire est difficile, dangereuse ou trop fréquente.

La signalisation variable est utilisée en situation d'exploitation ou hors situation d'exploitation. En situation d'exploitation, elle est destinée à signaler les dangers, les prescriptions, les indications ou les directions modifiées par les conditions variables du trafic, de l'environnement ou de la gestion du trafic, à informer des mesures évolutives d'exploitation du trafic, renseigner sur les conditions changeantes de circulation ou/et de déplacement. Hors situation

d'exploitation, elle est au neutre ou affiche un message de veille ou un message de sécurité routière de portée générale.

Un PMV est souvent intégré à un système de gestion dynamique du trafic assez complexe comprenant le recueillement automatique de données, le traitement de données, la production de l'information et la rediffusion de l'information via des dispositifs électroniques interactives.

Sur le réseau autoroutier français et certaines voies rapides urbaines, un grand nombre de PMV ont été déployé. Ils sont utilisé pour donner des renseignements variés selon la condition du trafic : le temps de parcours en temps réel vers une grande destination ; événements non récurrents : incident, accident, travaux, etc. et des conseils de conduite, de choix d'itinéraire ou de vigilance. Cependant ; le déploiement des PMV reste encore faible, seulement sur le réseau autoroutier interurbain et certaines voies rapides dans quelques grandes agglomérations.

### **2.2.3. Dispositifs de guidage nomades**

En général, un appareil de guidage se compose de deux éléments suivants :

- Un récepteur GPS permettant la localisation géographique précise, en temps réel.
- Une carte routière électronique/un calculateur d'itinéraire, contenant un logiciel et une base de données S.I.G, permettant de calculer la direction à suivre pour se diriger vers la destination.

Cet appareil de guidage peut être un appareil dédié (dispositif de guidage TOMTOM) ou un PDA intégré d'un récepteur GPS ou un Smartphone équipé d'une application spécifique et un récepteur GPS.

Par rapport à la navigation par le système de signalisation, la navigation par un dispositif de guidage nomade est beaucoup plus confortable car le conducteur est guidé pour chaque changement de voie, chaque tournage et l'itinéraire est recalculer en temps réel en fonction de la position présente du véhicule.

La cartographie électronique avec un système de référentiel cartographique et une base de données riche donne aux usagers un certain nombre de services complémentaires, notamment la présence des services sur le long du trajet ou à la destination (aire de repos, hôtel, restaurant, parking, etc.).

Certains appareils peuvent également se connecter à un serveur d'information de type RDS (Radio Data System)-TMC (Traffic Message Channel) ou de type GSM (sous un abonnement de services) (fournisseurs SFR, Orange, Bouygues) pour afficher de l'information dynamique concernant les événements routiers, les travaux, les places disponibles dans un parking ou les temps de parcours. Mais pour l'instant, aucun calculateur d'itinéraire n'est capable de prendre en

compte automatique de l'information dynamique dans le calcul d'itinéraire le plus court.

L'écran d'un dispositif de guidage TOMTOM indique la position du véhicule sur une carte numérique et la direction (les sections de route à prendre, détaillées par tournages) à prendre pour se diriger vers la destination. Cet appareil est capable de recevoir et puis d'afficher à droit de l'écran des informations concernant les conditions de circulation.

Le marché des appareils de navigation embarqué est très émergent au cours des dernières années avec la participation d'un grand nombre d'acteurs : opérateurs routiers (AFSA, DDE), fournisseurs d'information publiques (Bison-Futé, Citadin), fournisseurs d'information privés (V-traffic, Via Michelin), opérateurs radio TMC, opérateurs GSM (Orange, SFR, Bouygues), constructeurs automobiles, constructeurs électroniques, etc.

#### **2.2.4.Médias**

##### **Serveur Web**

L'information routière est également diffusée via certains sites web. En général, ces sites web contiennent les éléments essentiels suivants :

- Une cartographie électronique permettant de visualiser à plusieurs échelles, de trouver un lieu, un service, etc. grâce à un système de référentiel cartographique intégré.
- Un moteur de calcul d'itinéraire selon plusieurs options de critère.
- Une synoptique des événements, des travaux, des états du trafic et éventuellement les temps de parcours de certaines liaisons
- Des renseignements pratiques pour la conduite.

Bison Futé : <http://www.bison-fute.equipement.gouv.fr>

En tant que site web du CNIR, il diffuse officiellement des informations du CIR Bison – Futé. Les informations couvrent le réseau autoroutier et certaines routes nationales, voies rapides urbaines.

Citadin : <http://www.sytadin.tm.fr/>

Le Citadin est chargé de diffuser des informations sur le réseau des voies rapides de l'Ile de France. Plus détaillé que le site de Bison – Futé, il renseigne également le temps de parcours en temps réel de certains grands axes.

ASFA : <http://www.autoroutes.fr>

Les informations diffusées sur le site de l'Association des Sociétés Françaises d'Autoroute (ASFA) sont assurées par ses membres concessionnaires. En se basant sur l'information de Bison – Futé, chaque membre ajoute des informations supplémentaires concernant son réseau autoroutier.

Mappy : <http://mappy.fr/>; Via Michelin : <http://www.viamichelin.com/>

Mappy et Via Michelin se focalise sur le calcul d'itinéraire et sur les informations pratiques en exploitant une base de données statique couvrant plusieurs pays. Pour les conditions de circulation, ils redirigent les usagers vers le site Bison – Futé.

V-Trafic : <http://www.v-traffic.com>

En rassemblant des données de différentes sources : opérateurs autoroutiers, Bison-Futé, opérateurs des voies rapides urbaines, opérateur des voiries urbaines, V-Trafic dispose d'une base de données la plus complète. En parallèle, V-Trafic a déployé propre système de recueillement de données de type technologie des véhicules traceurs (FCD) et terminaux mobiles traceurs (FMD).

### Radio trafic

Sur les réseaux concédés, une fréquence de radio FM est chargée de communiquer des informations émises par les exploitant concernant les conditions de circulation, l'apparition des travaux, des événements, les conditions météorologiques. En fonction du réseau, cette radio est opérée par de différents opérateurs : Radio Trafic FM ; Autoroute Info ; 107.7 FM ; Autoroute FM. Ce système de radio, émettant sur une fréquence spécifique 107.7, couvre la quasi-totalité du réseau concédé et diffuse régulièrement des bulletins d'information routière. Le reste du temps, de la musique est programmée afin de s'assurer de l'écoute continue des voyageurs.

<i>Opérateurs de radio trafic</i>	<b>Réseaux concédés</b>
Radio FM	ASF, ECOSTA
Autoroute Information	APRR, AREA, ATMB, SFTRF
107.7 FM	SANEF, SAPN
Autoroute FM	COFIROUTE, ALIS

**Tab. 2-1 : Opérateurs de radio trafic sur les réseaux concédés**

Les informations sont diffusées au public sans personnalisation. Cependant un voyageur circulant sur l'A64 ne s'intéresse pas à l'information concernant le trafic de l'A4. Pour assurer la continuité de la diffusion et son adaptation aux contextes locaux, les radios d'autoroutes fonctionnent selon le principe du décrochage local en iso-fréquence : les informations sont ainsi sectorisées par tronçons autoroutiers grâce à des émetteurs de faible puissance synchronisés et directionnels suffisamment rapprochés, permettant de conserver la fréquence

identique FM 107.7 tout le long d'un trajet. Ces décrochages permettent d'émettre un programme différent du programme principal sur une section donnée du réseau, qui n'est entendu que par les automobilistes circulant dans le secteur concerné. Pendant les périodes de pointe et sur les principaux réseaux, les bulletins sont donnés en différentes langues.

En outre, la fonction RDS (Radio Data System) -TMC (Traffic Message Channel) de l'autoradio permet la réception automatique des bulletins d'information routière : avec les touches EON/TA, l'automobiliste qui écoute une cassette ou un CD, ou même laisse en veille son autoradio, peut alors recevoir les informations urgentes et importantes concernant le trafic par commutation automatique.

Sur les réseaux non-concédés, un certain nombre de radios nationales, régionales ou de « décrochages » régionaux des radios nationales sur la bande FM diffusent de l'information routière avec un nombre et une fréquence variables des points circulation, toutes les 7mn pour certaines, tous les quarts d'heures pour d'autres. Ceci permet aux voyageurs de choisir selon leurs besoins et leurs goûts musicaux, notamment sur la bande FM, telles que France Bleu, Autoroute FM, RTL2, NRJ.

### **Téléphone**

Bison Futé, les sociétés d'autoroutes ainsi que les sociétés privées offrent des services téléphoniques de renseignement sur l'information routière. Les serveurs donnent directement des informations correspondant à la demande de l'utilisateur. Les informations diffusées sont très diverses : les événements sur la route, les travaux, la condition de circulation, la météo routière, des choix d'itinéraire pour une paire origine - destination donnée, une alternative en cas de perturbation.

La coopération entre les opérateurs téléphoniques et les centres d'information routière, les serveurs web – trafic permet aux usagers de s'abonner et recevoir des informations routières via une connexion Wap avec une qualité similaire à celle d'un service Web.

### **Télévision**

Certaines chaînes de télévision diffusent régulièrement de l'information sur le trafic. Les informations restent toujours très générales : le calendrier du trafic Bison-Futé et les grands travaux menés sur le réseau.

### 2.2.5. Flux d'information routière aux usagers

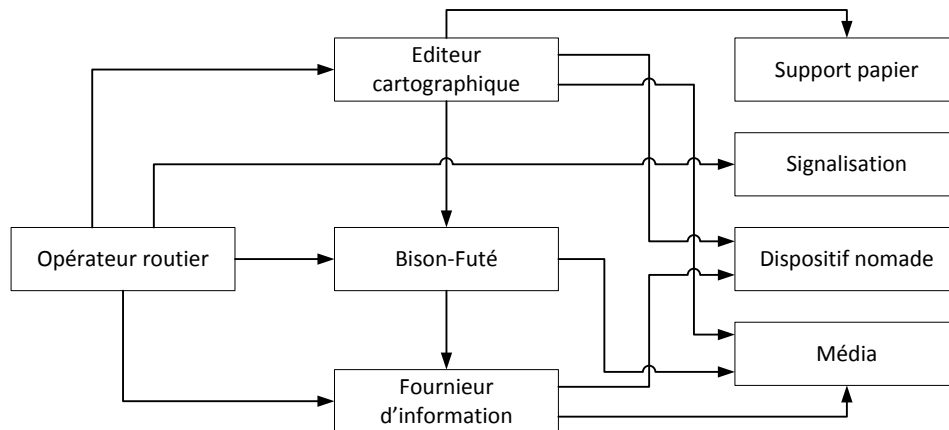


Fig. 2–1 : Acteurs et flux d'information

Supports	Fournisseurs	Condition d'accès
Support papier	Editeur IGN, Michelin, Blay Foldex	support payant
Signalisation	Opérateur routier	service/support gratuit
Guidage nomade	TomTom, Nokia, etc.	support payant
*option information trafic	V-traffic, Via Michelin	service payant
Médias	Divers	service gratuit
*téléphone	Opérateur et autres	payant

Tab. 2–2 : Services, fournisseurs et conditions d'accès

La Fig. 2–1 représente les services d'information routière et les lieux entre eux et les acteurs du domaine information routière aux usagers. Le Tab. 2–2 récapitule les services d'information routière aux usagers avec le fournisseur et la condition d'accès de chacun. Nous avons deux constats :

- Primo, les acteurs dans le domaine d'information aux usagers sont nombreux et les liaisons entre eux sont assez complexes.
- Secundo, malgré une variété des services proposés, il semble que toutes les informations viennent de la même source : l'opérateur routier.

### 2.3. CONTENUS D'INFORMATION ROUTIERE

En général, un message d'information routière se compose de plusieurs mots, chiffres, pictogrammes, symboles, etc. autrement dit de plusieurs composantes d'information. Un ensemble de composantes, avec une certaine configuration constitue d'un un message qui donne au voyageur certain contenu. Cette section §2.3 développe des analyses qualitatives à plusieurs niveaux de l'information routière aux usagers : au niveau désagrégué : quelles sont les composantes utilisées pour constituer les messages d'information routière ; au niveau agrégé :

quels sont les contenus que les services d'information routière donnent ou souhaitent donner aux usagers

### **2.3.1. Désagrégation : composantes d'information routière**

Comme avoir discuté ci-dessus, un message d'information routière peut se composer éventuellement un nombre de composantes d'information. Suite de la description des dispositifs de l'information routière présentée dans cette sous-section, nous identifierons un ensemble des composantes d'information. Cet ensemble contient les éléments existants et aussi des éléments souhaité pour un système d'information routière idéale.

#### **Nom de lieu**

Un lieu peut être une origine, une destination ou lieu intermédiaire à s'approcher au cours du voyage : une destination intermédiaire, un lieu de service, etc. Le nom de lieu est éventuellement affiché sur une carte routière papier ou électronique, sur un panneau de signalisation, etc.

#### **Localisation de lieu**

La position d'un lieu est éventuellement figurée sur une carte, sur un panneau de signalisation. Cependant le positionnement du lieu n'est pas toujours facile. Un dispositif de guidage permet un positionnement exact en temps réel de manière continue. Le repérage est également assuré par le système de signalisation directionnelle mais seulement les lieux importants (le niveau d'importance dépend du contexte) sont signalé.

#### **Caractéristique de lieu**

Les caractéristiques d'un lieu, telles que sa fonction urbaine, son extension spatiale, ses services sont d'une part signalé sur certains panneaux de signalisation et d'autre part décrit dans un livret routier ou dans une carte électronique avec le système de référentiel cartographique.

#### **Nom de route**

En générale, le nom d'une route est toujours figuré dans une carte papier ou électronique concernées. Le nom de la route où se trouve actuellement le voyageur est indiqué et rappelé par des panneaux de signalisation ou par un dispositif de guidage nomade.



### **Type routier**

Le type routier est indiqué soit par ses caractéristiques physiques ou géométriques et son environnement, ou par sa caractéristique d'exploitation. Le type d'une route est associé à son nom.

### **Type d'itinéraire**

Pour l'exploitant, chaque type d'itinéraire porte un nom reflétant le caractère d'exploitation spécifique de l'itinéraire, par exemple itinéraire européen, itinéraire autoroutier à péage, itinéraire touristique. Le type d'itinéraire exploitant est signalé par des panneaux de signalisation. Les types d'itinéraire exploitant sont également assez marquants sur une carte quelque soit papier ou électronique.

Pour le voyageur, un type d'itinéraire signifie une préférence spécifique avec laquelle qu'il choisit son itinéraire pour un déplacement donné : itinéraire plus court en distance, l'itinéraire le plus rapide, itinéraire le moins cher, itinéraire le plus confortable ou agrément (en qualité de chaussées, du tourisme ou de la gastronomie). Un moteur de calcul d'itinéraire sur un site web ou sur un dispositif nomade peut aider le voyageur à identifier l'itinéraire selon ses préférences.

### **Parcours d'itinéraire**

Le parcours d'un itinéraire est un enchaînement successif des tronçons routier conduisant d'une origine vers une destination. Par les principes de visibilité et continuité de la signalisation, le parcours de l'itinéraire exploitant est signalé et repéré par le système de signalisation

### **Caractéristiques physiques**

Les tronçons de route sont aménagés de manière spécifique selon son type routier pour mieux adapter aux besoins/conditions de circulation.

### **Contrôle de trafic**

Contrôle d'accès autoroute, gestion dynamique de voie, modulation de vitesse.

### **Itinéraire S/Bis**

La signalisation d'un itinéraire S ou Bis indique la présence d'une alternative sur des tronçons routiers où la cogestion est régulière ou prévisible. Les itinéraire Bis sont marqués sur certaines cartes papier et électroniques.

## **Péage**

Les tronçons autoroutiers à péage sont signalés par les panneaux de signalisation. Certains calculateurs d'itinéraire sont capables de calculer le coût de péage pour l'itinéraire correspondant.

## **Distance**

Il s'agit non seulement de la distance entre deux villes mais aussi la distance entre deux intersections ou entre un panneau et une intersection ou une ville. L'information sur la distance rend plus facile pour le voyageur de reconnaître sa position sur le réseau ou un lieu donné. Elle constitue également d'un indicateur de coût.

## **Temps de parcours**

Le temps de parcours entre deux lieux n'a pas toujours une valeur fixe. Il varie en fonction des conditions de circulation. On distingue donc deux types de temps de parcours : le temps de parcours statique estimé par un recensement des conditions normales, le temps de parcours dynamique en temps réel ou temps de parcours prévu. Le temps de parcours signifie évidemment un indicateur de coût.

## **Régime de circulation**

La circulation soit fluide, soit congestionné, soit perturbée. Le régime difficile de circulation peut être la conséquence d'un événement routier ou non (dans le cas échéant, il s'agit d'une congestion où la demande dépasse la capacité de l'infrastructure).

## **Événement routier**

Nous distinguons deux types d'événement : événement active non-prévisible (par exemple accident, incident, bouchon, etc.), événement prévisionnel non encore commencé (travaux, restriction de circulation), et événement prévisible devenu actif. La base de données des événements Bison-Futé est actualisée chaque 15 minute. Puis l'information est diffusée via média, PMV ou dispositif nomade.

## **Circonstance physique ou réglementaire locale**

Le changement de condition de circulation issue des caractéristiques de l'infrastructure, de l'environnement ou de l'implication du code de la route.

Au cours de notre lecture, nous avons trouvé une discussion similaire dans une thèse anglaise en psychologie et cognitive de conduite. Pour l'objectif d'identifier

l'ensemble des composantes d'information pour un système de guidage idéal, (Burnett, 1998) a proposé six types d'information : direction, distance, route et itinéraire, nœud, point de repère, catégorie des routes.

Nous considérons que la différence entre la liste proposée par (Burnett, 1998) et la nôtre est due à une différence de l'objectif de travail. Dans sa thèse, il s'intéresse à chercher des composantes d'information nécessaire pour la navigation sur un réseau et puis pour le guidage. A l'inverse, notre travail prend en compte également les considérations économiques des voyageurs pour leurs déplacements :

Le contenu d'un message d'information routière varie selon l'objectif de leur diffusion. Donc, la désagrégation nous permet de déterminer la nature du message, d'anticiper le comportement des usagers sous l'influence du message et aussi de représenter les messages d'information routière dans le modèle du trafic ce que nous développerons dans les travaux ultérieurs.

### **2.3.2. Agrégation : contenu d'information routière**

Un message contenant de l'information routière diffusé se compose d'un nombre de composantes identifiées à la section précédente §2.3.1. Cependant chaque composante d'information ne donne pas beaucoup de sens. Nous appelons contenu d'information pour certaine combinaison de composantes qui donne certain sens solide aux voyageurs. Nous nous focalisons à analyser six catégories de contenu de l'information routière : réseau global, itinéraire exploitant, lieux cibles potentiels, itinéraire usager, état du trafic et informations à la conduite. Pour chaque contenu, nous identifions ses éléments d'information et les technologies capables de diffuser les messages d'information respectifs :

#### **Réseau**

Le contenu « réseau » comprends des informations larges au niveau de l'ensemble d'un réseau. Plus précisément, un réseau routier est déterminé par les lieux et les liaisons entre eux. Les lieux sont caractérisés par leur nom, leur localisation mais aussi par leurs caractéristiques : fonction urbaine, attraction, extension spatiale, etc. Une liaison est évidemment un ou plusieurs tronçons de route : elle est caractérisée par le nom de la route (par exemple A6, N151) et son type routier (par exemple autoroute, route nationale). Le type d'une route signifie également sa modalité d'aménagement et d'exploitation, sa capacité d'accessibilité pour certaines classes du trafic, la limitation de vitesse, etc.

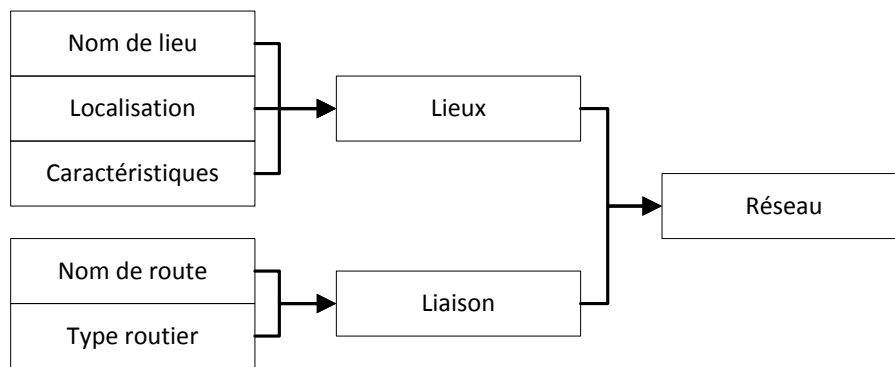


Fig. 2-2 : La formation du contenu « réseau »

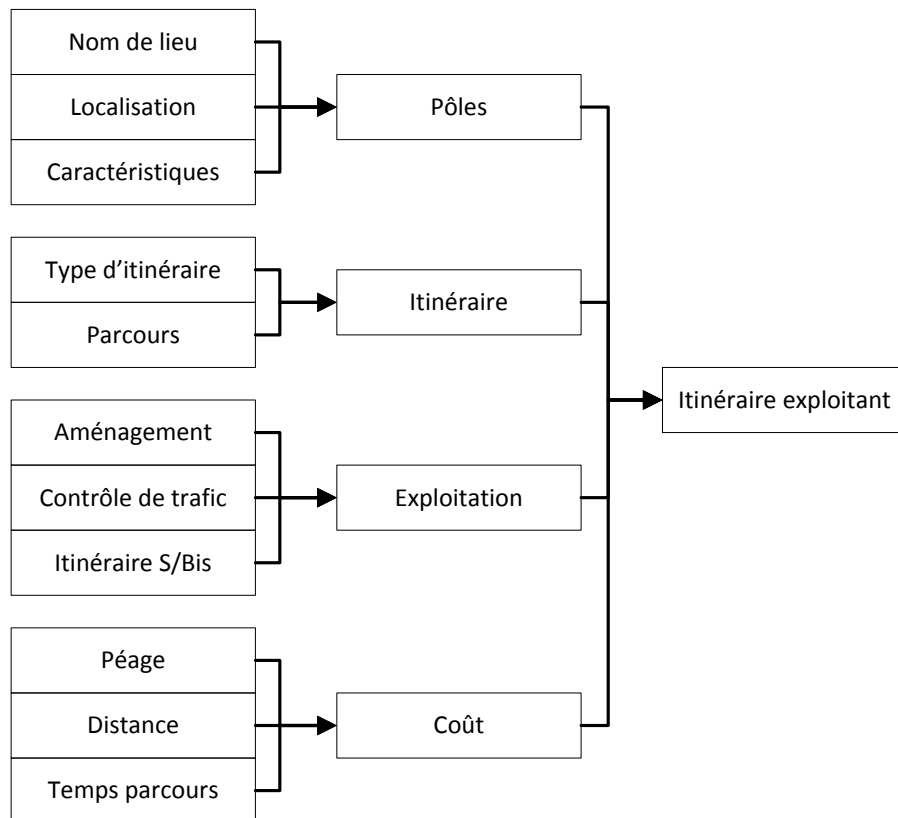
A priori, l'information concernant l'ensemble du réseau est statique et portée par dispositifs cartographiques (papier ou électronique). Cependant, la signalisation permet au voyageur d'avoir une connaissance partielle du réseau, notamment sur la partie concerné par son déplacement.

Dans un support cartographique, le nom, la localisation, les caractéristiques (fonction urbaine, type d'attrait, son extension dans l'espace ...) d'un lieu sont représentés par un symbole adapté à la fonction, l'extension dans l'espace et la grandeur du texte et symbole. Le type d'une route est représenté par son nom sur une carte. Sa longueur peut-être marquée ou non. Sur certaines cartes, on présente la condition prévue du trafic. Dans tous les cas, les routes les plus importantes sont faites marquant.

### Itinéraire exploitant

Sur un réseau routier, certaines routes sont soumises à une exploitation spécifique, appelées « itinéraire exploitant », par exemple itinéraires européens, routes à grande circulation, itinéraires à gabarit restrictif. Eventuellement, une route révèle plusieurs typologies (par exemple route départementale à grande qualité touristique). En général, que les liaisons classées (liaison entre les deux pôles/ lieux importants) sont reliées par itinéraire exploitant. Les informations relatives à un itinéraire exploitant sont : les deux pôles origine-destination, l'itinéraire, le mode d'exploitation et les coûts de l'itinéraire. L'exploitation d'un itinéraire consiste également à préparer des itinéraires Bis et S pour le cas où il y a une grande congestion sur l'itinéraire principal.

A priori, les itinéraires exploitants sont prioritaires dans le signalement par le système de signalisation routier. La signalisation se fait par balisage en rappelant et en identifiant les routes le long de l'itinéraire. En principe, elle ne signale que les routes, qui présentent bien les attributs de type d'itinéraire. Le rabattement incite toujours les voyageurs à se diriger vers le réseau routier national ou autoroutier.



**Fig. 2-3 : La formation du contenu « itinéraire exploitant »**

Par nature, un itinéraire exploitant entre deux pôles est souvent l'itinéraire le plus court entre deux pôles, donc recommandé par calculateurs d'itinéraire dans un dispositif nomade avec les critères : « itinéraire plus rapide » ou « itinéraire autoroute ».

### **Itinéraire usager**

« Itinéraire usager » est un itinéraire choisi par l'utilisateur pour un déplacement entre une origine et une destination fixée par le voyageur. En fait, le voyageur choisit son itinéraire selon le contexte de son déplacement et ses goûts propres. Outre les informations concernant le type d'itinéraire, la topologie, les coûts ou une alternative, un élément d'information important est la navigation ou la connaissance sur la topologie locale qui permet à l'utilisateur de bien s'adapter aux circonstances locales, telles que : « changer de voie », tourner « à droite », « tourner à gauche ». La navigation se fait avec l'aide de la signalisation ou un dispositif de guidage.

Les études sur le comportement des voyageurs (Bovy, Stern, 1990) montrent que le choix d'itinéraire est influencé par la structure pyramidale du réseau routier : en partant du point de départ, le conducteur prend tout d'abord des routes de bas niveau en vue d'approcher les routes du plus haut niveau le plus rapidement

possible et y demeure le plus longtemps possible. A proximité de la destination, il utilisera des routes intermédiaires afin d'accéder au lieu souhaité.

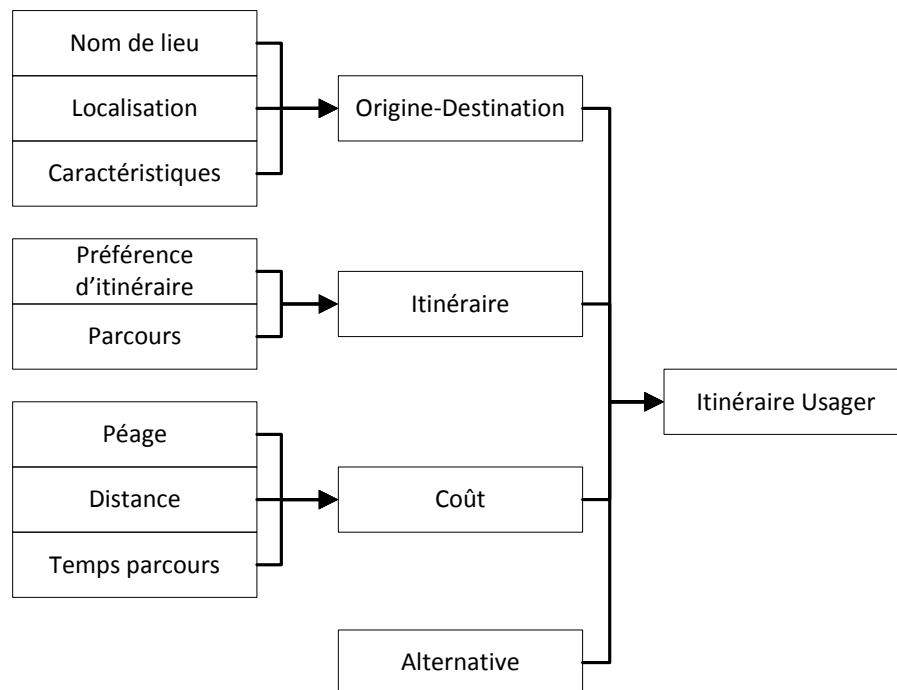


Fig. 2-4 : Formation du contenu « itinéraire usager »

Dans cette logique, la recherche des lieux cibles potentiels pendant le trajet est toujours importante. Cela peut être une grande ville, un échangeur ou une sortie, etc. Cette information comprend le nom de lieu, la distance restante, le temps restant et la route à prendre pour les approcher.

Le « lieu cible potentiel », pour les voyageurs, est une destination finale ou intermédiaire dans leur déplacement. Une indication d'un lieu cible peut être un élément de repérage. Pour se diriger vers un lieu cible, voyageurs ont besoin des informations telles que : le nom du lieu cible, la distance restante, la route ou la voie à prendre, etc. Donc, elles sont notamment signalées par le système des panneaux (fixes ou PMV) sur les routes.

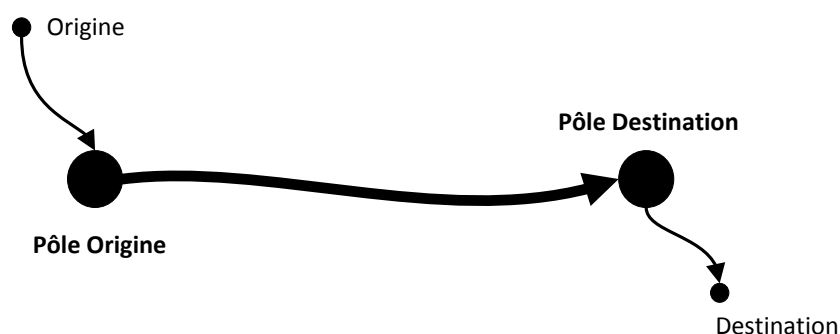


Fig. 2-5 : Lieu cible potentiel, itinéraire usager et itinéraire exploitant

La Fig. 2–5 illustre la superposition et la différence entre « itinéraire usager » et « itinéraire exploitant ». Nous prenons un exemple où un voyageur souhaite effectuer un déplacement entre Origine (son domicile) et Destination (son lieu de travail) dans le cas il ne dispose pas de dispositif guidage. Pôle Origine et Pôle Destination est une liaison important dont l'itinéraire est exploité, signalé par l'opérateur routière. Pour se diriger d'Origine vers Destination, le voyageur devrait suivre la signalisation locale pour atteindre le repère Pôle Origine, puis suivre l'itinéraire exploitant jusqu'à Pôle Destination, et en fin suivre à nouveau la signalisation locale pour arriver jusqu'à Destination. Itinéraire Origine-Destination est l'itinéraire usager identifié pour un besoin de déplacement personnel pendant que itinéraire Pôle Origine – Pôle Destination est itinéraire exploitant exploité pour drainer un grand flux de trafic entre deux pôles.

### Conditions de circulation

Un événement routier est un événement non récurrent ou une circonstance qui peut perturber la circulation normale : un incident, un accident, la présence des travaux sur la route, les conditions météorologiques difficiles, une congestion, etc. L'annonce d'un événement est suivie également de sa localisation et de son importance.

L'état du trafic sur un certain lieu, à une condition temporelle ou prévisionnelle est le régime de circulation au niveau de charge ou de débit avec éventuellement des perturbations. Après, le recueillement et le traitement des données, les CIR donnent des informations sur l'état du trafic. On informe aux usagers la présence d'événements et leur conséquence immédiate (en temps réel), une prévision à court terme ou une prévision à long terme.

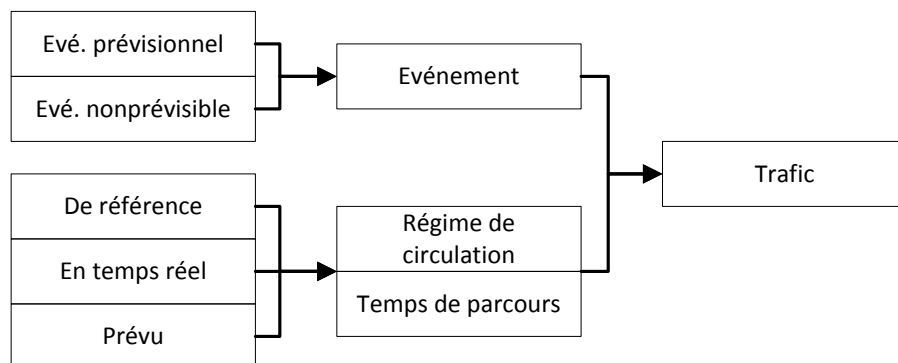


Fig. 2–6 : Formation du contenu « Trafic »

### Infos à la conduite

Indications à portée d'obligation ou de recommandation pour amener les usagers à bien s'adapter aux circonstances locales afin d'éviter des risques d'accident, des perturbations de trafic comme : limite de vitesse, vitesse conseillée, vigilance ou des règles particuliers.

## **2.4. CROISEMENT DES CONTENUS ET DES DISPOSITIFS**

Le Tab. 2–3 croise les contenus et les dispositifs de l'information routière avec les dispositifs en ligne et les contenus d'information en colonne. Ce croisement nous donne deux constats importants sur les conditions d'accès à l'information lié à l'équipement :

- Primo, sans avoir d'équipement spécifique en information, l'utilisateur dispose d'une certaine connaissance, même grossière, sur le réseau et les itinéraires grâce aux supports d'informations routières publics, tels que la signalisation, les médias publics, ou les supports papiers
- Secundo, seuls les supports électroniques sont capables de communiquer de l'information concernant les conditions évolutives du trafic à court/moyen terme.



	<i>Réseau</i>	<i>Itinéraire exploitant</i>	<i>Itinéraire usager</i>	<i>Info. trafic</i>	<b>Conduite</b>
<b>Support papier</b>					
*Carte papier	réseau à échelle fixe	maqué sur la carte	à tracer manuellement par l'utilisateur	non	position des radas fixes
*Livret routier	réseau à multi-échelles, lieux et services	itinéraire Bis, itinéraire conseillé	non	calendrier Bison-Future	non
<b>Signalisation</b>					
*de direction	Une partie du réseau	signalé de manière continue, distance	non	non	navigation
* d'indication	certaines lieux et services	péage	non	non	ralentissement, vigilance
* de police	non				oui
* PMV	non	Incitation vers itinéraire Bis	non	événement, régime, temps de parcours	ralentissement, vigilance
<b>Guidage nomade</b>					
*dispositif simple	à plusieurs échelles, les lieux et les services	maqué sur la carte	calculateur d'itinéraire		navigation automatique
* avec un abon. Info.				événement, régime, temps de parcours	
<b>Médias</b>					
*Serveur web	réseau à multi-échelles, lieux et services	maqué sur la carte	calculateur d'itinéraire	événement, régime, temps de parcours	oui
*Radio			conseil itinéraire	événement, régime	oui
*Téléphone			conseil itinéraire	événement, régime, temps de parcours	oui
*Télévision	Non	non	non	Régime de référence	oui

Tab. 2-3 : Croissement contenus-dispositifs d'information routière

## **2.5. CONCLUSION DU CHAPITRE**

Dans ce chapitre, nous avons établi une description complète sur les services d'information routière aux usagers. Cette description est accompagnée par des analyses profondes sur les contenus et les composantes de l'information diffusée aux usagers. Au niveau agrégé, les contenus principaux de l'information routière sont identifiés: réseau, itinéraire exploitant, itinéraire usager, conditions du trafic et information à la conduite. L'information routière est diffusée par de variables supports d'information, certains supports sont des équipements publics, accessibles pour tous les usagers tandis que les autres sont des équipements privés dont l'accès est limité à certains usagers à un certain coût. L'information sur les conditions du trafic porte de différentes natures : statique/ dynamique, historique, en temps réel, prévisionnelle, etc.

Un croisement des contenus et des dispositifs d'information nous a rendu une meilleure compréhension sur les conditions d'accès à chaque contenu/type d'information en fonction de l'équipement. L'information dite « dynamique » sur les événements qui se produisent éventuellement sur le réseau ne peut être diffusée que par des dispositifs électroniques.

Cependant, nous avons analysé les services d'information routière aux usagers de manière séparée du système de gestion du trafic qui comprend la chaîne de production de l'information. En outre, l'information routière est utilisée par l'opérateur comme une mesure de gestion du trafic en synergie avec d'autres mesures. Donc il est nécessaire d'éclairer les questions suivantes :

- Comment la production de l'information routière s'intègre à un système d'exploitation du trafic ? comment une information se qualifie dynamique ou statique ?
- Quel sont les objectifs de l'opérateur en matière de gestion du trafic liés aux services d'information routière.
- Comment l'information routière se synchronise à d'autres mesures de gestion du trafic sur un réseau.

## Chapitre 3. Information routière et exploitation du trafic

---

### 3.1. INTRODUCTION

#### 3.1.1. Contexte

L'acteur principal des services d'information routière aux usagers est souvent l'opérateur du réseau – lui-même. La production de l'information s'intègre dans l'ensemble des actions d'exploitation du trafic sur un réseau. La diffusion de l'information s'effectue souvent en synchronisation avec d'autres mesures de gestion du trafic. Il est nécessaire de voir l'information routière dans l'ensemble des actions d'exploitation du trafic pour mieux comprendre la procédure de production de l'information, le rapport entre une mesure de gestion du trafic appliqué et la diffusion de l'information associée. L'information routière abordée dans ce chapitre donc ne limite pas à l'information aux usagers mais également celle pour l'opérateur.

Cependant, l'exploitation du trafic ne se déploie pas de manière homogène sur tous les réseaux. L'équipement d'un réseau routier/autoroutier dépend du volume de la demande, du niveau de service exigé, etc.

#### 3.1.2. Objectif

Ce chapitre est de décrypter la complexité d'un système routier en précisant le réseau, les acteurs concernés, les facteurs déterminant les conditions du trafic ainsi que les mesures de gestion potentiellement appliquées. Les analyses détaillées sur la procédure de recueillement de données et traitement de données et d'application des mesures de gestion nous permettent d'éclairer les variables d'action, la motivation de l'opérateur pour chaque mesure et aussi le lien entre l'information routière aux usagers et d'autres mesures appliquées.

#### 3.1.3. Contenu

Nous commençons par une description plus précise d'un réseau routier : les acteurs concernés, la composition de la demande, les caractéristiques de l'offre, les aléas/variations dans le réseau et puis les problématiques d'exploitation routière (§3.2). Puis nous rappelons les mesures d'exploitation routière qui sont couramment utilisées ou potentiellement utilisés (§3.3). Après, nous présentons les méthodes de recueillement et de traitement de données (§3.4 et §3.5). Cela nous permet d'entrer dans la chaîne de production de l'information. En fin, nous menons une discussion afin d'identifier la nature de dynamisme de l'information et de bien distinguer information statique versus information dynamique (§3.6).

### **3.2. RESEAU ROUTIER**

Un réseau routier typique est souvent complexe. La complexité du réseau routier s'exprime en trois aspects : réseau, usagers et exploitation. Géographiquement, un réseau routier typique est étendu dans l'espace. Il se compose d'un grand nombre de routes, d'intersections de différentes caractéristiques physiques. Il est régulièrement ou aléatoirement influencé par les conditions environnementales et météorologiques : le jour, la nuit, la pluie, le vent, etc. Puisque il s'étend sur un territoire vaste sur lequel on y trouve les activités humaines qui conditionnent la demande de déplacement, variable dans le temps : pendant la journée, la semaine ou entre les différentes périodes de l'année selon le niveau des activités humaines : tourisme, manifestations, etc. De plus, les usagers de la route sont très différents de l'un à l'autre en préférences, en comportement de déplacement. La route peut être dégradée par un surcharge, par un accident produit par un conducteur négligent ou par d'autres facteurs plus ou moins aléatoires. La planification, la construction et l'exploitation des routes sont concernées par nombre d'acteurs.

#### **3.2.1. Composition de la demande**

Grand Dictionnaire Terminologique (Office québécois de la langue française, 2009) définit un déplacement comme « *un mouvement effectué d'un point origine à un point de destination* ». Donc la demande de déplacements sur un réseau routier est caractérisée par volume par origine-destination, par catégorie de véhicule concernée (voiture légère, poids lourd, etc.), par motif de déplacement (domicile-travail, loisir, etc.), par mode d'usage, notamment taux d'occupation de véhicule et aussi par préférences personnelles du conducteur.

##### **Catégorie de véhicules**

En circulant sur la route, les véhicules de différentes caractéristiques physiques (gabarit, puissance, émission, etc.) engendrent différents effets sur le trafic, notamment en vitesse, accélération, espace occupé, distance inter-véhiculaire, endommagement d'infrastructure, etc. C'est la raison pour laquelle certaines catégories de véhicules sont soumises des politiques d'exploitation particulières en tarification, allocation de voie ou exploitation d'itinéraire, par exemple restriction ou contournement des poids lourds, voie réservée aux bus, etc.

##### **Mode d'usage**

Pour les raisons sécuritaires ou socio-économiques, le mode d'usage du véhicule est un facteur important à considérer dans l'exploitation du trafic :

Les véhicules transportant des matières dangereuses (par exemple produits chimiques, pétroles) sont restreints à certaine partie de l'infrastructure ou à une opération spécifique.

Les véhicules transportant à haut taux d'occupation, par exemple, bus, taxi ou voiture à plus de deux occupants sont encouragés par certaines mesures d'exploitation (cf. Affectation variable des voies)

### Préférences individuelles

Les comportements des usagers souvent varient en fonction de leurs caractéristiques sociodémographiques, par exemple : les usagers ayant une haute revenu ont tendance d'avoir la valeur du temps plus élevé que les gens ayant base revenu. Par conséquence, les riches sont plus motivés pour réduire leur temps de déplacement (en basculant vers d'autres itinéraires, en s'abonnant de l'information, etc.)

### Variation de la demande

En générale, déplacement n'est pas une activité seule mais il est associé à d'autres activités, par exemple, un voyageur effectue un déplacement vers une destination parce qu'il a besoin d'être à cette destination pour réaliser certaines activités : travailler, faire la course, jouer au sport, etc. C'est pourquoi le volume de la demande de déplacement est conditionné par les autres activités socio-économiques ou culturelles, etc. Les besoins de déplacements sont différents entre le matin, le midi et le soir ; entre les jours dans semaine et les jours de weekend ; entre les périodes de travail et les périodes de vacance.

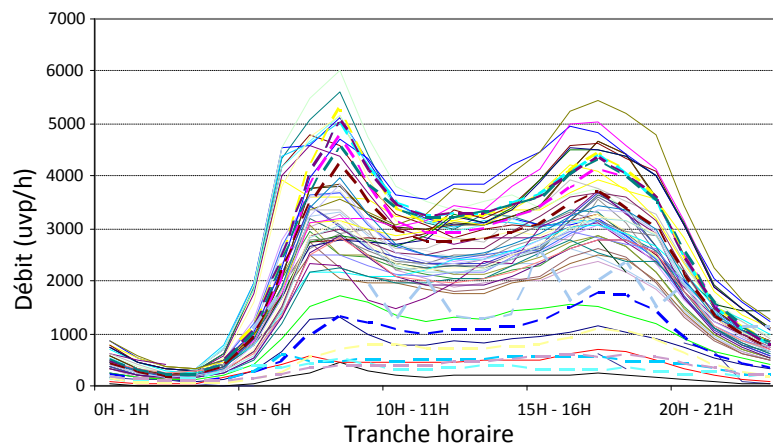


Fig. 3-1 : Débit moyen par tranche horaire sur la Francilienne A104 en 2008

La Fig. 3-1 présente la variation de la demande de déplacement au cours d'une journée d'un couple O-D sur le réseau des voies rapides en île de France qui servent notamment des déplacements pendulaires domicile-travail. Elle nous

montre bien que le volume de demande est bien déséquilibré entre deux sens de déplacement, entre les différentes périodes de la journée.

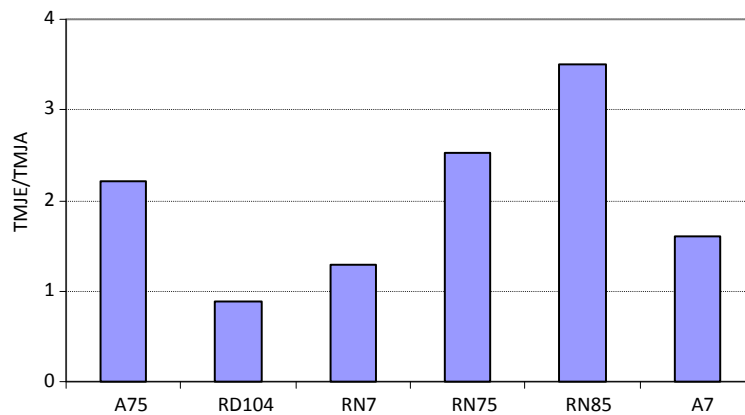


Fig. 3-2 : Rapport TMJE/TMJJA dans la vallée du Rhône en 2002

La Fig. 3-3 montre une forte hausse de trafic en période estivale sur l'A7 due au fait que la demande de déplacement du Nord vers le Sud pour le motif loisir est beaucoup plus élevée pendant la période d'été que les autres périodes de l'année.

Les variations de la demande sont évidemment font l'objet de différentes politiques d'exploitation routière qui nous décrivent dans des sections suivantes.

Pour une analyse plus profonde sur la variation et stochasticité du système de transport, le lecteur est invité à consulter (Bonsall, 2004)

### 3.2.2. Formation de l'offre

L'offre de transport routier est caractérisée par la capacité de l'infrastructure, par les équipements routiers associés ainsi que par les politiques d'exploitation. De plus, elle est conditionnée par le volume de la demande et des perturbations éventuelles qui induisent les effets de congestion, quelque soit récurrente ou non.

« Sur un réseau de transport, la congestion est le phénomène de trafic selon lequel une concentration accrue de mobiles, par le jeu de leurs gênes mutuelles, dégrade la vitesse de chacun et la qualité de service pour tous » (Leurent et Nguyen, 2008).

#### Congestion récurrente vs. Congestion non-récurrente

Dans les statistiques publiques, la congestion est souvent considérée comme un phénomène unique non-différencié, sans tenir compte des diverses natures et des différentes causes de la perte de qualité de service qu'elle entraîne. Pour

trouver des solutions appropriées et rationnelles aux problèmes associés à la congestion, il faut différencier les divers types de congestion et leurs variées origines. A cet égard, il y a trois types de congestion (OCDE, 1998):

- Une réduction de capacité routière provoquée par un événement imprévu, par exemple, un accident ou la voie est bloquée à cause des épaves
- Une réduction prévue de la capacité due à la construction ou à l'entretien de la voie
- Une demande de transport plus forte que la capacité maximum d'écoulement du trafic

Si l'on regarde le caractère de périodicité de la congestion, la congestion peut être catégorisée en deux types : récurrente ou non-récurrente. La congestion récurrente est en générale le résultat des facteurs se produisant régulièrement/périodiquement sur le réseau de transport, par exemple la hausse de la demande aux heures de pointe du matin et du soir pour les déplacements domicile-travail pendulaire ou la hausse de la demande en weekend et en période de vacances scolaires pour les déplacements de loisir. La congestion non-récurrente est causée par des événements imprévus ou simplement irréguliers tels que travaux, incident, accident, mauvaises conditions météorologiques, etc. dont les effets impliqués sur le réseau sont plus ou moins aléatoires, et difficiles à anticiper ainsi que modéliser.

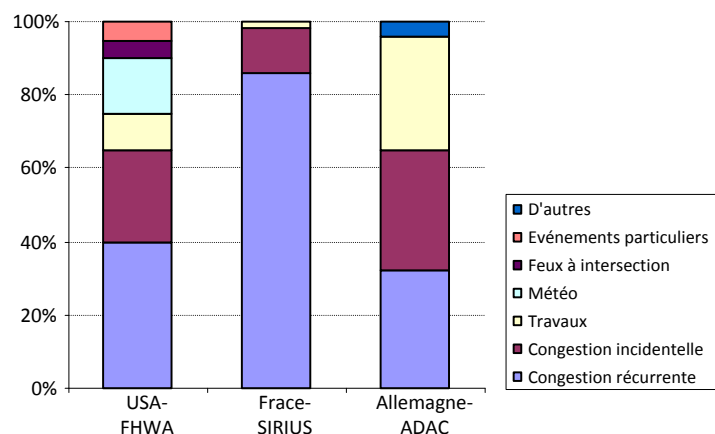


Fig. 3-3 : Répartition de congestion par type, notamment récurrente vs. Non-récurrente

La Fig. 3-3 montre qu'une partie importante du volume total de la congestion est non-récurrente. Cependant, la frontière entre la congestion récurrente et non-récurrente est assez floue. A côté de la variation récurrente, la demande porte également stochastique. La capacité d'une section routière n'est pas une valeur fixe, elle porte aussi certain élément stochastique. Des travaux peuvent être considérés comme événements irréguliers. Mais si la durée de travaux est assez longue, ils peuvent être considérés comme un facteur régulier.

## Relation débit-vitesse

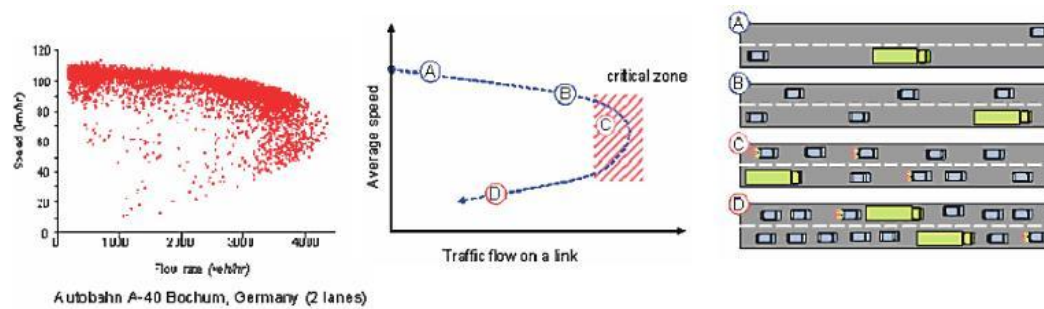


Fig. 3-4 : Relation débit-vitesse : observation et modélisation (OCDE, 2007)

La Fig. 3-4 présente les différents régimes du trafic: fluide, critique et saturé : la vitesse diminue en fonction du débit. Si le débit dépasse certain seuil, le débit critique, la vitesse continue à baisser sans engendrer un renforcement de débit. Ce phénomène est appelé « chute de capacité ». La vitesse est également un indicateur du niveau de service.

Les différents types de congestion font l'objet de différentes mesures d'exploitation :

- La congestion récurrente peut être anticipée auparavant. La stratégie d'exploitation est donc de segmenter le temps en plusieurs périodes dans lesquelles la demande est stable, puis d'appliquer pour chaque période un plan de gestion du trafic adapté.
- La congestion non récurrente est difficile voire impossible à prévoir. Elle exige d'une exploitation adaptative en temps réel. La gestion de la congestion non-récurrente contribue également à améliorer la fiabilité du system.

### 3.2.3. Exploitation du trafic

#### Notion d'exploitation

Au début du temps de transport automobile, le terme « exploitation » avait resté essentiellement sur l'exploitation de l'infrastructure, c'est-à-dire la maintenance de la viabilité, la sécurisation des usagers et la facilité de l'usage d'infrastructure. Celui d'aujourd'hui exige en plus le besoin d'optimiser l'usage de l'infrastructure par d'une part la gestion de l'offre et d'autre part par la gestion de la demande. *« L'exploitation de la route peut être définie comme l'ensemble des actions de gestion du trafic et d'information des usagers destinées à permettre, améliorer ou faciliter l'utilisation d'un réseau existant, quelles qu'en soient les conditions d'utilisation »* (PIARC, 2003)



## **Multiples objectifs**

Bien que l'objectif principal de l'exploitation du trafic soit d'optimiser, faciliter l'usage de l'infrastructure, l'exploitation porte également d'autres objectifs qui sont souvent multiples à cause de la complexité du réseau et nombreux acteurs concernés :

- Sécurité routière
- Lutte contre la pollution, l'émission de gaz à effet de serre
- Développement territorial

## **Equité, acceptabilité**

L'élaboration des mesures d'exploitation du trafic exige des considérations précieuses sur l'équité et acceptabilité car les mesures exploitation routière concernent de nombreux acteurs : l'état, les collectivités, l'opérateur, les usagers, etc. De plus, la demande se compose de différentes catégories d'usagers : les mesures d'exploitation donnent souvent de différents effets même sur une catégorie d'usagers.

## **Les domaines d'action**

La Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière a indiqué les missions de l'exploitation routière en tels trois groupes (guide de SDER, 2001) :

*Le maintien de la viabilité* : c'est l'ensemble de interventions sur le terrain destinées, en cas de perturbations, à maintenir ou à rétablir les conditions d'utilisation les plus proches de l'objectif défini pour chaque voie.

*L'aide au déplacement* : c'est l'ensemble des dispositions destinées à améliorer le confort et la sécurité des usagers de la route, notamment par la diffusion d'informations et également par l'organisation de services tels que le dépannage.

Au de-là du retard en temps de parcours, la congestion provoque également une baisse de sécurité et une augmentation de la pollution environnementale. Dans « Livre blanc - La politique européenne des transports à l'horizon 2010 », la congestion est sérieusement reconnue comme une source que l'Europe va risquer de perdre sa compétitivité économique. Les recensements récents ont montré que les coûts externes de la congestion du trafic routier s'élève à 0.5% le PIB européen.

L'exploitation de la route repose sur une connaissance exacte de la situation du réseau routier, qu'il s'agit de la préparation des action qui doit s'appuyer sur une analyse du trafic et des conséquences des mesures envisagées ou des action en temps réel qui s'appuient sur l'état exacte de circulation.

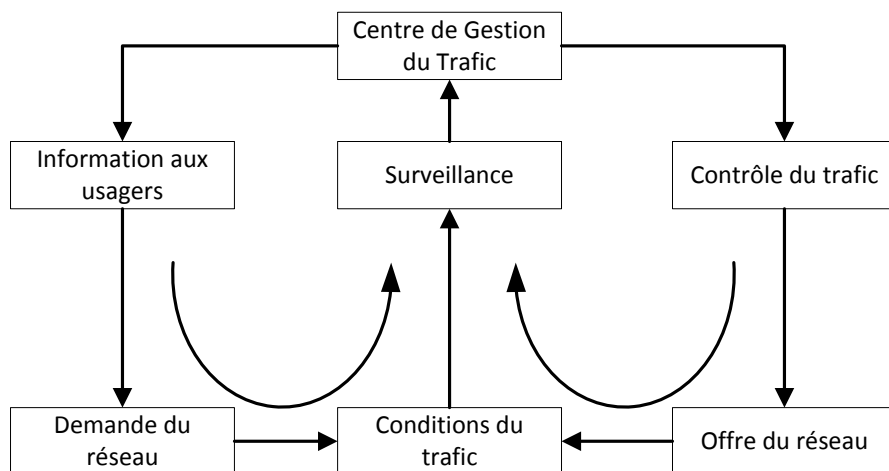


Fig. 3-5 : Schéma des actions de l'exploitation du trafic

En principe, un système d'exploitation routier se compose de trois modules : recueil de données, traitement de données et moyens d'action. Le schéma ci-dessus (Fig. 3-5) décrit d'une part le réseau routier avec ses deux côtés l'offre et la demande et d'autre part le système d'exploitation routier associé et son mécanisme d'intervention pour optimiser l'usage de l'infrastructure.

Au point de vue économique, un système routier se constitue de l'offre et la demande. Son fonctionnement dépend évidemment des interactions offre – demande. Au niveau du réseau, la demande est constitué du nombre de déplacement par origine – destination, du profile temporel de la demande et aussi des préférences de déplacement des voyageurs. Au niveau local, la demande est le nombre de véhicules qui se présentent sur une section de la route. En vue globale, l'offre du réseau routier signifie les possibilités de déplacement offertes à l'utilisateur pour réaliser un déplacement d'une origine vers une destination avec leurs caractéristiques : temps de parcours, péage, confort, service, horaire de départ, etc. En vue locale, elle signifie la capacité et la vitesse d'écoulement sur une section courante.

L'interaction offre – demande consiste d'abord du choix des usagers : mode de transport, horaire, itinéraire, etc. selon leurs préférences individuelles, leur contexte de déplacement et l'état du réseau et puis la formation des services par le chargement du trafic qui est engendré par le choix des usagers.

Il faut noter que l'état du réseau n'est pas invariable. Il varie dans le temps et dans l'espace en fonction de la variation de la demande de déplacement de l'apparition des perturbations (travaux, incident, congestion) qui sont parfois aléatoires.

A la base du système d'exploitation routière c'est le recueil de données. Une base de données pour l'exploitation du trafic comprend plusieurs types de

données : réseau, environnement, trafic, etc., recueillies manuellement ou automatiquement par des capteurs spécialisés. Et puis, les données sont traitées en temps réel pour que surveiller le trafic et dans le cas nécessaire, intervenir sur le réseau par des commandes particulières. Selon la situation et la disponibilité des moyens d'action, l'opérateur peut commander une intervention de patrouille (police, dépannage, service de secours, etc.), modifier la configuration de l'infrastructure et des équipements afin d'adapter l'offre à la demande ou informer les usagers afin de guider leur choix de déplacement.

#### **3.2.4. Hiérarchie des réseaux**

La mise en œuvre effective des différents services destinés à répondre aux attentes des usagers de la route ne peut être organisée de façon identique pour tous les réseaux routiers parce que l'ampleur des perturbations et les niveaux de trafic varient sensiblement et que les fonctions fixées aux réseaux sont hiérarchisées ; ces attentes auront donc des réponses différentes selon la nature du réseau, le nombre d'usagers concernés, la fréquence des perturbations et leurs conséquences sur l'écoulement des flux de circulation. Afin de définir le niveau d'exploitation le mieux adapté à un réseau donné, différents paramètres doivent être analysés et quantifiés tels que :

- les types de voies (caractéristiques géométriques, fonctions) ;
- la capacité des voies ;
- les niveaux de trafic attendus ;
- la nature, la fréquence et l'importance des perturbations ;
- le nombre de partenaires concernés pour la surveillance du réseau et les interventions ;
- les montants d'investissement et d'exploitation mobilisables.

Selon (PIARC, 2003), trois niveaux d'exploitation peuvent être retenus :

##### **Le niveau 1 : les réseaux structurants des agglomérations**

En agglomération, on est amené à développer une conception intégrée du système de déplacements et à classer les voies selon l'importance relative des fonctions liées à la vie locale ou au trafic de transit. Le réseau structurant de l'agglomération peut être décomposé en deux catégories :

- les voies rapides urbaines : c'est-à-dire les autoroutes ou voies assimilables aux autoroutes car perçues comme telles par les usagers en raison de leur aspect ou de leurs conditions d'utilisation (site protégé, chaussées séparées, carrefours dénivelés, accès interdits à certaines catégories d'usagers) ; la fonction trafic est exclusive ; elles assurent notamment la continuité au droit des agglomérations des grands itinéraires nationaux ou régionaux ;

- les voies associées à ces voies rapides : assurant comme les précédentes une fonction de grand transit et d'échange au-delà de l'agglomération ; tout en conservant des relations fonctionnelles avec l'environnement, la fonction trafic, sans être exclusive, est prépondérante et privilégiée.

Les réseaux structurants d'agglomération sont soumis à des mouvements pendulaires liés aux déplacements quotidiens domicile - travail qui se traduisent par des niveaux de trafic qui font fonctionner les réseaux à la limite de la saturation. Le moindre incident entraîne généralement une congestion de la voie qui peut dégénérer en une paralysie rapide de l'itinéraire et même d'une partie importante de l'agglomération. Cependant le réseau est souvent maillé et il peut exister, à tout moment, des réserves de capacité sur certains tronçons.

Une autre caractéristique de ces réseaux est la complexité des responsabilités : les maîtres d'ouvrages et les exploitants sont nombreux pour participer à la définition de la politique des déplacements dans une agglomération. Une concertation permanente est nécessaire entre les autorités compétentes dans le but :

- d'arrêter la stratégie générale de gestion du trafic sur les voies rapides urbaines et le réseau associé,
- de coordonner cette stratégie avec celles de gestion du réseau urbain (carrefours à feux) et des transports en commun,
- de définir en cas de congestion trop importante due à des événements exceptionnels, les modalités éventuelles de délestage des voies rapides sur un réseau associé,
- d'offrir aux usagers des informations routières de qualité, fiables, pertinentes, permettant l'utilisation optimale d'un réseau tout en offrant la possibilité d'un choix intermodal,
- d'améliorer la sécurité par une surveillance renforcée des principaux axes et, en cas de perturbations, de rétablir rapidement des conditions normales de circulation,
- de limiter la gêne à la circulation créée par des chantiers en améliorant leur planification.

Il s'agit d'optimiser en permanence l'utilisation du réseau. Les fonctions à mettre en œuvre résident dans l'activation permanente des plans de gestion du trafic élaborés par l'ensemble des partenaires concernés. Le système de surveillance du réseau et le traitement de l'information doivent être permanents et automatisés. C'est sur ce réseau que la densité d'équipements de recueil et de diffusion d'informations sera la plus élevée (par exemple SIRIUS en Île de France ou CORALY à Grand Lyon)

## **Le niveau 2 : les grands corridors autoroutiers interurbains**

Le réseau concerné comprend l'axe autoroutier et le réseau associé (routes parallèles et itinéraires de délestage).

Sur ces corridors à fort trafic de transit national et international, les perturbations sont fréquentes, avec l'apparition de périodes de congestion lors des migrations saisonnières. Leurs impacts sont importantes car elles concernent un grand nombre d'utilisateurs et peuvent se répercuter en amont sur des distances importantes. Par ailleurs, les perturbations de l'axe principal peuvent rapidement s'étendre aux axes parallèles.

L'objectif d'exploitation de ce niveau est de maintenir, lors des perturbations, les meilleures conditions possibles d'écoulement de l'ensemble du trafic, par une utilisation optimale du réseau. Il est indispensable de coordonner les actions des différents services gestionnaires. Les plans de gestion du trafic qui en résultent doivent être étudiés et mis en œuvre conjointement avec des mesures préventives prises parfois très en amont de la perturbation. Ils seront activés lors des perturbations.

Les fonctions à mettre en œuvre sont identiques à celles du niveau 1. Par contre la densité des équipements sera moindre et leur localisation adaptée aux objectifs d'exploitation : détection automatique d'incidents dans les zones à risque ou limitée aux jours les plus sensibles, information des utilisateurs par panneaux à messages variables en amont des points de choix, etc.

## **Le niveau 3 : les axes secondaires assurant le maillage du réseau interurbain**

Le réseau concerné est constitué de routes à trafic modéré. Ces routes se caractérisent par le fait que les perturbations importantes restent rares et leurs effets sont localisés. Le nombre d'utilisateurs impliqués est également limité.

L'objectif d'exploitation est surtout d'assurer un bon service de viabilité et de sécurité sur l'ensemble du réseau. Pour la gestion des perturbations aléatoires, il ne sera en général pas nécessaire d'organiser à l'avance des plans de gestion du trafic, ni de rétablir immédiatement la capacité normale de trafic sur la route, mais il est souhaitable de diffuser la meilleure information possible sur les gênes existantes ou leur arrivée prévisible.

Les fonctions à mettre en œuvre consistent en l'organisation des interventions prévisibles de viabilité telles que le service hivernal, la planification des chantiers, l'organisation des convois et des manifestations pour limiter la gêne aux utilisateurs, et l'information de ces derniers avant leur déplacement ou en cours de route.

**Le Schéma Directeur de l'Exploitation de la Route (SDER)** distingue quatre types de réseau dont un pour l'urbain et trois pour l'interurbain : le niveau 1 correspond aux voiries des plus grandes agglomérations françaises, le niveau 2 intègre les corridors autoroutiers stratégiques et les liaisons frontalières avec l'Italie et l'Espagne, le niveau 3 correspond aux autoroutes concédées non classées en niveau 2 et aux sections de route caractérisées par des perturbations temporaires ou saisonnières, en fin le niveau 4 regroupe tous les autres.

### 3.2.5. Exploitant et les acteurs concernés

Avant 2006, l'exploitation des réseaux routiers d'Etat (3 900 km d'autoroutes non-concédées, de routes nationales et de routes départementales confondues) est assurée par les DDE<sup>1</sup>. Depuis la deuxième décentralisation en 2006, les routes nationales et les autoroutes non-concédées sont gérées par les DIR avec une logique d'exploitation par itinéraire (un itinéraire peut probablement s'allonger sur plusieurs départements, plusieurs régions)

Voies	Responsable	Décideur	Constructeur /gestionnaire
Autoroutes concédées	Etat	DGR <sup>2</sup>	Sociétés concessionnaires
Autoroutes non concédées et routes nationales	Etat	DGR	SMO <sup>3</sup> / DIR <sup>4</sup>
Routes départementales	Département	Conseil général	Services techniques du département
Voies communales	Commune	Conseil municipal	Services techniques de la commune

**Tab. 3-1 : Catégories de route, responsable, décideur et gestionnaire correspondants, source : [www.route.equipement.gouv.fr](http://www.route.equipement.gouv.fr)**

La Tab. 3-1 présente la hiérarchisation administrative des routes et autoroutes françaises. Les autoroutes et routes nationales sont à responsable de l'état, sous la direction de la DGR dont l'exploitation et construction est confiée d'une part aux concessionnaires pour la partie concédée, et d'autre part par les DIR et les SMO. La Fig. 3-6 présentent la répartition des réseaux concédés et non-concédés sur l'ensemble du territoire français.

<sup>1</sup> Direction Départementale de l'Equipement

<sup>2</sup> Direction Générale des Routes

<sup>3</sup> Services régionaux de Maîtrise d'Ouvrage

<sup>4</sup> Direction Interdépartementale des Routes

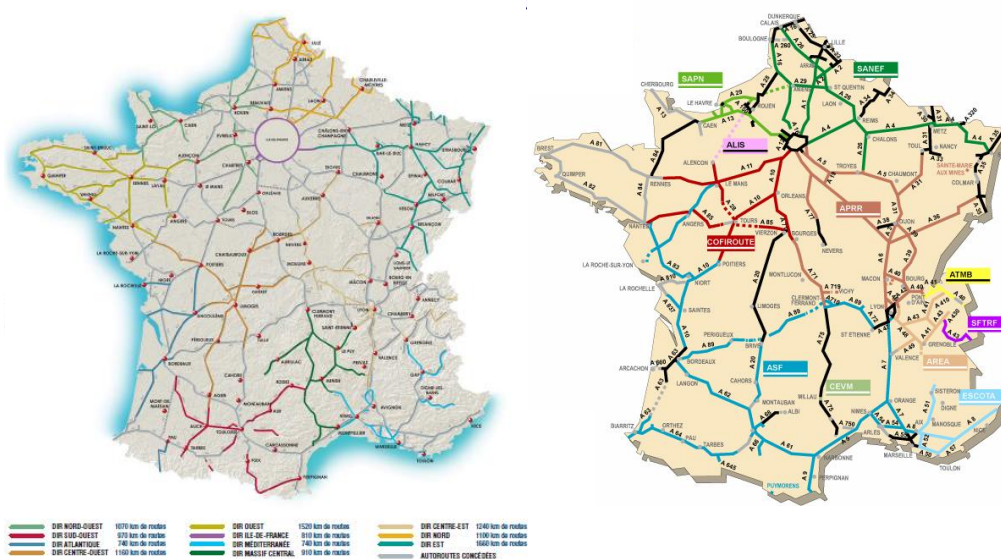


Fig. 3-6 : Répartition du réseau magistral par gestionnaires

Sur une zone géographique ou sur un réseau spécifique, c'est le CIGT<sup>1</sup> qui est la structure opérationnelle chargée d'élaborer et de mettre en œuvre la stratégie d'exploitation de la route. Il coordonne les interventions, gère le trafic, informe des événements en cours ou prévisibles les usagers et l'ensemble de partenaires institutionnels impliqué dans la gestion d'un réseau routier et l'information des usagers.

Selon le réseau concerné, les différents types de CIGT sont :

- Les CIGT départementaux qui, dans la plupart des cas, sont une émanation de la Cellule Départementale d'Exploitation et de Sécurité de la DDE
- Les CIGT d'axes que l'on rencontre en milieu interurbain et qui ont en charge l'exploitation d'un ou de plusieurs axes majeurs (autoroutes de liaison, voies express)
- Les CIGT de voies rapides urbaines tels ceux mis en place dans le cadre d'opérations comme SIRIUS<sup>2</sup>, CORALY<sup>3</sup>, MARIUS<sup>4</sup>
- Les CIGT urbains dédiés au réseau d'une commune ou d'un regroupement de communes importantes et qui se distinguent par une approche multimodale des problèmes d'exploitation.

Pour être capable de gérer les événements prévisibles ou imprévisibles de différentes conséquences (allant d'un incident, accident à une crise), il est

<sup>1</sup> Centre d'Ingénierie et de Gestion du Trafic

<sup>2</sup> Système d'Information pour un Réseau Intelligible aux Usagers, un système de gestion du trafic automatisé déployé en Île de France

<sup>3</sup> Système d'exploitation des voies rapides à Grand Lyon

<sup>4</sup> Système d'exploitation des voies rapides à Marseille

nécessaire pour le CIGT d'anticiper, préparer et également évaluer les effets, la pertinence des actions appliquées puis pour coordonner les différents acteurs concernés dont le plan de gestion du trafic Sur chaque réseau pris en charge, l'opérateur joue évidemment le rôle responsable, décideur qui surveille le trafic et dans le cas nécessaire coordonne de différents acteurs. Les actions d'exploitation sont mises en œuvre par plusieurs services différents pour lesquels les tâches correspondantes ne constituent qu'une seule partie des missions qui leur sont confiées. Ils sont en charge d'autres actions permanentes. Ces actions doivent respecter les pouvoirs de décision propres à chaque hiérarchie, notamment en ce qui concerne l'organisation et l'emploi des moyens.

- Les autorités locaux, notamment la préfecture
- Les forces de l'ordre
- Le CRICR
- Les pompiers, les SAMU, les services de dépannage, etc.

Afin d'assurer la cohérence au niveau national et régional, l'exploitation de différents réseaux autoroutiers et routiers est régie par certains services centraux : DSCR (Direction de Sécurité et de Circulation Routière), DPS en terme de politiques d'exploitation routière ; SETRA, CETU, CETE(s), CERTU en terme de méthodologie et d'études techniques ; et CNIR et CRIR en terme de l'information routière.

### 3.3. LES MESURES D'EXPLOITATION

La Fig. 3-7 illustre l'ensemble des mesures d'exploitation ainsi que leur champ d'influence. Cette section décrit les mesures d'exploitation potentiellement utilisées en milieu périurbain et interurbain. Nous commençons d'abord par le contrôle de feux à intersection.

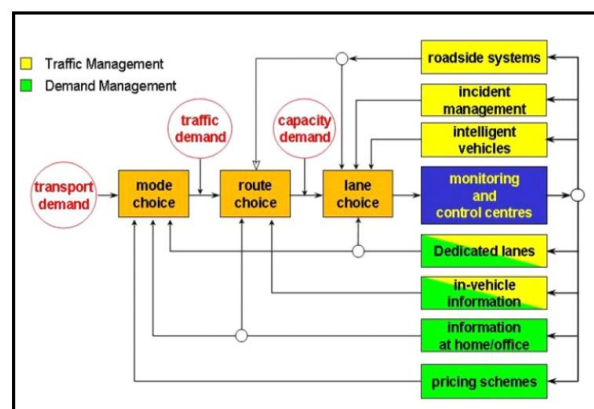


Figure 1: The ITS control Scheme

Fig. 3-7 : Composantes d'un système d'exploitation routière. Source : (Middelham, 2008)



### 3.3.1. Feux à intersection

#### Le principe

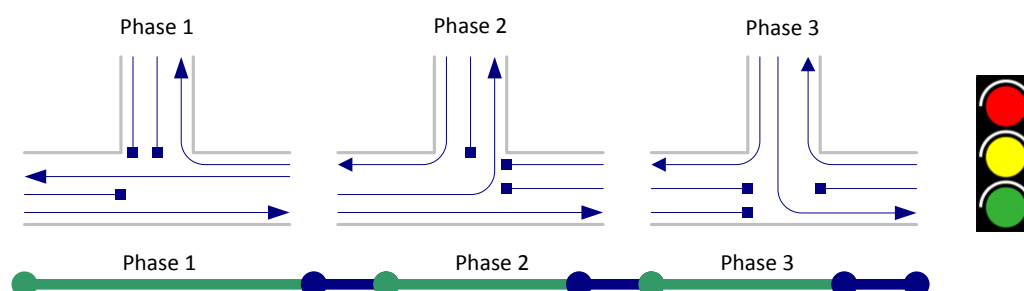


Fig. 3-8 : Phasage et temps admis à une intersection « T »

La confrontation de différents courants de véhicule sur une intersection diminue énormément sa capacité d'écoulement. Un phasage du trafic dans un cycle de contrôle permet d'éviter les conflits et d'améliorer la capacité d'écoulement de l'intersection. Le système de feux est utilisé pour séparer dans le temps de l'admission des différents courants de véhicules ayant des conflits qui sont perturbant pour l'ensemble du trafic. Son usage est étendu à la protection de passages piétons en section courante et aussi au franchissement d'une voie réservée aux véhicules des services réguliers de transport en commun.

Les indications des feux : vert, jaune, rouge succèdent à l'intérieur d'un cycle défini comme étant la durée constante séparant deux passages successifs de l'ensemble des signaux par le même état. Un cycle est divisé en temps admis (vert) en phase et temps perdu. Les temps perdus entre les phases sont nécessaires pour éviter toute interférence entre les flux antagonistes des phases successives.

La capacité d'une entrée est conditionnée par la durée du temps vert attribuée à cette entrée :

$$VC = \frac{gS}{c}$$

Dans laquelle :

- $VC$  durée de temps vert attribuée à l'entrée,
- $S$  désigne la capacité totale de l'entrée,
- $c$  la durée de cycle du feu, et
- $g$  la durée effectif du vert.

Le contrôle de trafic par feux à intersection améliore les conditions de circulation en séparant les flux de trafic de différentes directions pour éviter les conflits dans l'intersection. Bien que la performance globale soit bien améliorée, le contrôle se concrétise par l'attribution de temps admissible pour chaque entrée

qui se traduit par une limite de capacité d'écoulement (le partage d'une capacité global à plusieurs flux) ou par un temps d'attente au feu.

### **Stratégies de contrôle**

Au cours des années, plusieurs stratégies de contrôle ont été développées. Le choix de stratégie se fait en fonction des conditions de trafic, de l'objectif, du besoin d'exploitation ainsi que des équipements installés. En général, nous distinguons la stratégie de « temps-fixe » dont les cycles de feux sont calculés et fixés par des données historiques sans prise en compte les conditions effectives du trafic versus la stratégie adaptative dont les cycles de feux s'adaptent aux conditions réelles du trafic. Nous distinguons également la stratégie « isolés » dont les cycles de feux de chaque intersection sont calculés de manière indépendante des intersections voisines versus la stratégie intégrée avec laquelle les cycles de feux sont calculés pour l'ensemble des intersections voisines.

Une stratégie de contrôle du trafic peut prendre en compte éventuellement diverses politiques de transport, par exemple la priorité des transports en commun, la tarification, l'établissement de l'optimum collectif (Ghai et Smith., 1993; Clegg, Ghali *et al.*, 1995)

#### *« Temps-fixes » versus « Réactive »*

Ces méthodes consistent à déterminer le phasage et le cycle de feux afin de maximiser la capacité de l'ensemble de l'intersection, de minimiser les temps d'attentes à intersection en basant sur des données historiques de trafic. Une méthode de calcul des phases de feux dans cette catégorie est (Webster, 1958). Les méthodes bien connues au plan opérationnel sont SIGSET et SIGCAP, proposées par (Allsop, 1971; Allsop, 1976). En général, les stratégies « temps-fixes » ne sont applicables aux conditions de trafic non-saturées car la demande n'est pas constante (elle varie entre les différentes périodes) et la capacité de l'infrastructure peut être réduite par un incident/accident, etc. Dans cette catégorie, on peut appliquer à une intersection un plan de feux fixé ou plusieurs plans de feux adaptés à chaque périodes particulières : heures de pointe du matin, heures de pointe du soir, heures creuses, etc.

Le contrôle avec une stratégie réactive utilise la mesure de trafic en temps réel utilisant des boucles de détection inductives. Une des stratégies les plus simples est la méthode « véhicule-intervalle » qui est applicable à intersection en deux phases. Les durées minimum et maximum de temps vert sont initialement attribuées aux deux phases. S'il n'y a pas de véhicule passant le détecteur correspondant pendant le temps vert minimum, le contrôle passe à la phase suivante. Si un véhicule est détecté, un intervalle de temps vert critique (supplémentaire) est créé durant laquelle un nouveau véhicule détecté produit à un prolongement de temps vert qui permet au véhicule de traverser l'intersection. Si aucun véhicule n'est détecté pendant l'intervalle

supplémentaire, le contrôle passe à la phase suivante, si non un intervalle supplémentaire est créé à nouveau, jusqu'à la durée de temps vert maximum. D'autres méthodes de contrôle, plus sophistiquées, sont introduites par (Miller, 1963; Vincent et Young, 1986).

#### « Contrôle intégré »

Le contrôle intégré peut être appliqué pour la stratégie de temps fixe, par exemple le cas de « Green wave- Onde verte ». L'application à la stratégie réactive est plus compliquée car elle exige d'un ordinateur central pour calculer en temps réel des cycles de feux (envoi vers control d'accès)

En France, le Certu contribue dans le développement méthodologique et d'outils opérationnels de ce domaine avec DIAGFEUX – logiciel de calcul de diagramme de feux, MITEMPS – logiciel d'analyse de temps de parcours, OndeV – logiciel de calcul d'ondes vertes.

#### Cas d'application

La régulation et coordination des feux à carrefour en réseau a été déployée dans nombreux agglomérations françaises par des systèmes informatisés de recueillement et de traitement des données et puis de contrôles du trafic, par exemple : le système SITER dans les Hauts-de-Seine, le système PARCIVAL dans le Val-de-Marne, le système GERFAUT en Seine-Saint-Denis ou le système SURF sur Paris (Stif, 2009), etc.

#### 3.3.2. La régulation d'accès

##### Principe

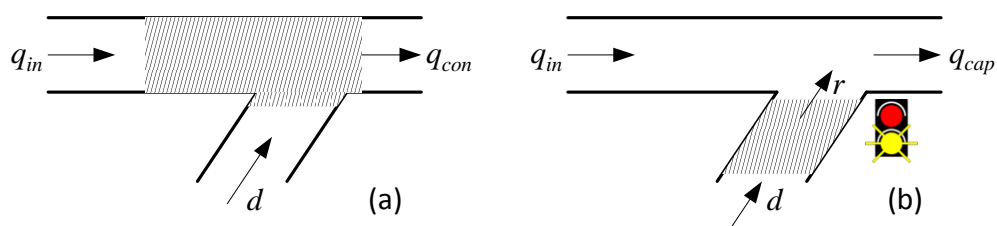


Fig. 3-9 : Stockage des véhicules dans le cas non-régulé (a) et régulé (b).

L'idée du contrôle d'accès vient directement du diagramme fondamental débit-vitesse. La capacité d'écoulement d'une section n'est optimale qu'à un taux d'occupation critique (cf. Fig. 3-4). A la limite de saturation, un excès de demande entraîne toujours une chute importante de la capacité.

Le principe de la régulation, illustrée sur la Fig. 3-8, consiste à réguler le débit entrant sur l'autoroute afin de maintenir la demande à un niveau inférieur à la capacité d'écoulement, au delà de laquelle apparaît la congestion. Pour cela, on

utilise les bretelles d'accès aux autoroutes comme des zones de stockage temporaires et essaie de faire fonctionner l'autoroute dans la zone la plus stable, la plus optimale de la courbe débit-vitesse.

En revanche, la régulation peut engendrer certains problèmes à résoudre :

- Le débordement sur la bretelle voire sur le réseau : si le débit sur la section autoroutière est élevé, le stockage sur la bretelle risque d'être très important qui suit par un débordement du réseau secondaire.
- Le problème d'équité entre les voyageurs : la priorité à flux sur la section courante limitera l'accessibilité des voyageurs contrôlés sur bretelle. Dans le cas d'une série des bretelles contrôlées sur une autoroute, avec ce principe sans tenir en compte d'autres critères les usagers en amont sont plus prioritaires que les usagers en aval.

Pour résoudre ces problèmes, à côté de l'optimisation du flux sur la section courant, l'algorithme doit prendre en compte le stockage sur bretelle, et le temps d'attente entre les différentes bretelles, donc un problème d'optimisation multicritère. Les critères à optimiser peuvent être variés : de maximiser le nombre de véhicules servis (ce qui équivaut à minimiser le temps total passé, de maximiser le nombre total de voyages à distance ; d'équilibrer les files d'attente sur plusieurs bretelles voisines.

### Différentes stratégies de contrôle

#### Régulation locale

Une stratégie de régulation locale connue aux Etats-Unis, appelée « *stratégie de demande-capacité* », utilise des données de comptage au voisinage de la bretelle pour calculer les valeurs adaptées. Dans cette méthode, le débit entrant est contrôlé par le débit en amont et le taux d'occupation en aval. Le débit entrant de la bretelle peut être égal à la capacité résiduelle si le trafic en aval n'est pas encore congestionné. Pour le cas contraire, le débit entrant est mis à une valeur minimum pour éviter le débordement sur la bretelle.

Une autre méthode est ALINEA (Papageorgiou, Hadj-Salem *et al.*, 1997) dans la quelle le débit entrant d'un moment est calculé à partir du celui précédent et le taux d'occupation en aval :

$$r(k) = r(k-1) + K_R[\hat{o} - o_{out}(k)]$$

$$r(k) = r(k-1) + K_R(\hat{o} - o_{out}(k))$$

, où :  $K_R > 0$  est un paramètre de régulation, et  $\hat{o}$  est le taux d'occupation désiré pour la section autoroutière en aval de la bretelle (typiquement, mais non

nécessairement  $\hat{o} = o_{cr}$ , dans ce cas-là, le débit en aval de l'autoroute s'approche sa capacité).

Noter que l'observation du débit en amont n'est pas explicitement utilisée dans ALINEA pendant que la stratégie de demande-capacité ne réagit qu'à excès du taux d'occupation. ALINEA réagit sensiblement à même une légère différence de taux d'occupation résiduel et donc cela peut éviter la congestion par la stabilisation de l'écoulement du trafic. De plus, la valeur paramétré de  $\hat{o}$  peut être éventuellement modifié donc et donc ALINEA peut être incorporé dans un système de contrôle hiérarchique dans lequel la valeur  $\hat{o}$  de chaque bretelle individuelle est spécifiée en temps réel par une coordination partielle ou intégrale du réseau ou par un opérateur.

Toutes les stratégies de régulation d'accès devraient calculer les volumes du trafic entrant adaptés sur les bretelles. Dans le cas la régulation est réalisée par les cycles de feux, le débit entrant est converti en duré de la phrase verte (cf. §3.3.1)

Dans le cas de contrôle par temps fixe, les données historiques permettent de déterminer les périodes types, les plans de régulation se déclenchent pour certaines périodes dans la journée. Une telle régulation statique est moins exigeante en équipage mais elle ne peut pas s'adapter bien à la réalité de l'exploitation du trafic car la demande n'est pas constante : elle varie dans la journée et parmi les jours. En réalité, cette mesure peut conduire (en raison de l'absence de mesures en temps réel) soit à la surcharge des grands flux (congestion), soit à une sous- utilisation de l'autoroute (Papageorgiou, Diakaki *et al.*, 2003).

#### *Régulation multi-variable*

La stratégie de régulation en multi-variables a pour le même objectif que la régulation locale, elle tente de maintenir les conditions de circulation à proximité d'une configuration souhaitée. Pendant que la régulation locale fait fonctionner les contrôles d'accès de manière indépendante en se fondant sur les observations locales, la régulation multi-variable profite de toutes les principales observations afin de calculer simultanément et entièrement toutes les bretelles. La régulation multi-variable METALINE peut être considérée comme une généralisation/extension de ALINEA. Quelques expérimentations ont montré que METALINE ne donne aucun avantage sur un réseau avec la congestion récurrente. Cependant, METALINE est plus performante que ALINEA dans le cas de congestion non récurrente (Papageorgiou, Diakaki *et al.*, 2003).

#### *Stratégie d'optimisation non linéaire*

La prévention et réduction de la congestion sur le réseau autoroutier peuvent améliorer considérablement l'efficacité de l'infrastructure, surtout en débit et temps total. La congestion sur une autoroute de capacité limitée résulte de trop de véhicule essayant d'utiliser un corridor non coordonné. Une fois que la congestion se produit, la capacité d'écoulement du trafic baisse. La stratégie de régulation réactive peut être utile dans certains cas mais ses actions sont plus ou moins locales. Sur un réseau ou un corridor autoroutier relativement long, l'exploitation du trafic devrait s'effectuer à un niveau de coordination plus élevé. Une telle stratégie de régulation devrait tenir en compte de différentes contraintes, notamment : l'état du trafic sur le réseau autoroutier ainsi que sur le réseau auxiliaire ; la prévision de la demande pour court et moyen terme ; la capacité de stockage sur les bretelles, les perturbations sur le réseau, etc.

### **Cas d'application**

Le contrôle d'accès est une technique de régulation des autoroutes très utilisée aux États-Unis depuis les années 60. Le premier contrôle d'accès a été implanté sur une autoroute américaine en 1963 (Congress Express Way, Chicago) et depuis, étendu sur plusieurs autres sites tels que Los Angeles et New-York etc.

Depuis les années 1980, l'INRETS a entrepris d'importants travaux de recherches et d'expérimentation dans ce domaine. Les objectifs fixés ont consisté respectivement à évaluer la limite et l'impact du contrôle d'accès et à analyser le coût/efficacité des anciennes et nouvelles stratégies de régulation isolé et coordonnées en simulation et sur site réels en France et à l'étranger (Holland, Angleterre). Ces travaux ont donné naissance en 1986 à la stratégie, mondialement connue, ALINEA (Asservissement Linéaire d'entrée sur Autoroute) qui est mise en place en France (A6W) et à l'étranger (Holland : Couentunel d'Amsterdam, Ecosse : Glasgow) dans le cadre de plusieurs projet Européens (1988-1998). En 2000, dans le cadre d'une convention INRETS/SIER, une large étude en simulation a été entreprise. Elle couvre toute la partie Est des autoroutes de l'Ile de France. Le site comprend environ 250 km d'autoroute et 70 accès dont 50 sont à réguler. L'objectif premier est l'évaluation en simulation de l'impact du contrôle généralisé (isolé et coordonné). Les résultats obtenus ont montré d'une part la limite du contrôle d'accès isolé dans le cas de large réseau et d'autre part l'impact très positif du contrôle d'accès coordonné (Aron, 2001), (Haj Salem, 2006)

### **3.3.3.Régulation de vitesse**

#### **Le principe**

L'idée fondamentale de la régulation de vitesse est assez similaire de celle de la régulation d'accès : Eviter la formation de congestion sur le corridor principal (autoroute ou voie rapide urbaine) en maintenant de taux d'occupation autour d'une valeur optimale, probablement inférieur au taux critique. Au lieu de

stocker les véhicules sur le réseau auxiliaire (ou sur les bretelles) comme dans le cas de régulation d'accès, la régulation de vitesse vise à stocker en amont du corridor principal.

Il s'agit de limiter de façon temporaire et dynamique la vitesse autorisée (inférieure à la vitesse autorisée par la prescription permanente) en fonction de l'état du trafic et de l'objectif cherché en utilisant des panneaux d'information, notamment des panneaux à messages variables (PMV) et la radio trafic.

La régulation permet d'éviter la formation de congestion, la chute de capacité sur le corridor puis d'améliorer la fluidité et permet de réduire le volume de congestion et donc le niveau des émissions polluantes ; elle contribue également, au travers d'une harmonisation des vitesses pratiques, à améliorer le niveau de sécurité.

### Stratégie

Bien que le principe soit assez simple, la mise en œuvre de cette mesure nécessite d'un algorithme performant au niveau de commandement, pour déterminer les variables d'action, notamment: le moment de déclenchement, la réduction de vitesse autorisée nécessaire et le périmètre d'application. Celui-ci devrait être mis en relation avec un système de recueillement et de traitement de données en temps réel pour déterminer les propriétés principales de l'état du trafic, et les événements perturbants éventuels sur le réseau. (cf. §3.5.2)

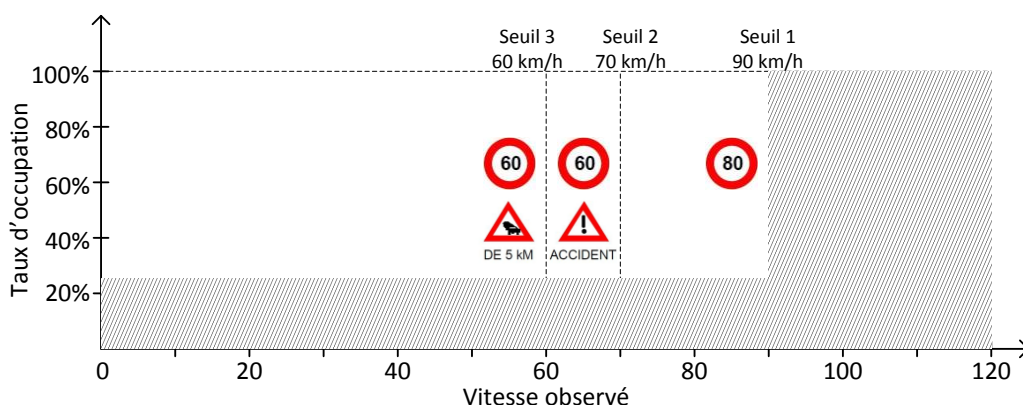


Fig. 3-10 : Les seuils de déclenchement des limites de vitesse et des informations associées à diffuser aux usagers via PMV. (exemp)

La méthode couramment utilisée est de définir des seuils de vitesse. A chaque seuil de vitesse, une option de régulation est associée. Si la vitesse observée sur une section de route est dans un des seuils prédéfinis, l'option de régulation va se déclencher. Bien entendu, la réduction de vitesse autorisée est accompagnée par des messages d'information diffusée aux usagers sur ce sujet.

Depuis 2004, la régulation de vitesse est appliquée sur l'A7 – réseau ASF. Les vitesses autorisées réduites sont vitesse à 110, 90 ou 70 en fonction de l'état du trafic. Un algorithme détermine la vitesse en fonction des indications de capteurs et de la topographie du terrain.

L'algorithme suivant a été appliqué en Suisse : La limite de vitesse sur l'autoroute est de 120 km/h. Il y a pas de vitesse à faible concentration (lorsque le taux d'occupation des capteurs est inférieur à 25%) ni lorsque la vitesse observée est supérieure à 90 km/h. Sinon :

- Si la vitesse observée est comprise entre 70 km/h et 90 km/h, la limite de vitesse à 80 km/h est affichée
- Si la vitesse observée est comprise entre 60 et 70 km/h, la limite de 60 km/h est affichée avec un panneau de danger,
- Si la vitesse observée est inférieure à 60 km/h, la limite de 60 km/h est affichée avec un panneau de bouchon.

Lorsque la vitesse en aval est réduite – par suite d'un incident, d'un bouchon, d'un rétrécissement de la voirie, d'un convoi de poids lourds – il faut adapter la vitesse du flux des véhicules progressivement, la vitesse prescrite et conseillée sur les PMV successifs d'un même automobiliste rencontre, ne doit pas varier trop rapidement, il ne faut pas non plus que les différents affichages semble incohérents, aussi l'algorithme opère un lissage des informations des capteurs et des décisions. L'abaissement de la vitesse doit s'effectuer par palier de 20 km/h. La réalisation de telles installations doit suivre certaines règles. L'emplacement des sections avec la signalisation variable est déterminé en fonction de plusieurs critères. Un premier critère est celui du cadencement, pour que les usagers soient informés suffisamment une position doit être prévue tous les 1,5 km environ. Un deuxième critère dépende de l'emplacement des jonctions, en effet il est utile de placer une position directement après la rampe d'entrée sur l'autoroute. D'autre critère peuvent encore intervenir en fonction des locales. Le contrôle du trafic peut se faire aux mêmes emplacements que la signalisation variable, il est aussi possible de prendre plus d'emplacements pour augmenter la précision de la détection.

### **Application**

Nombreuses expérimentations ont été effectuées en France pendant des années 1970s et 1980s (Aron, 2001). Cette mesure est actuellement appliquée pour l'A7, l'A9 (en expérimentation) par la société ASF.



### **3.3.4.Tarification**

#### **Principe et formes d'application**

Comme montré dans le Tab. 3–2, la tarification du transport routier peut exister sous plusieurs formes et porter éventuellement plusieurs objectifs.

Forme Objectif	Taxation générale	Taxe sur véhicules	Taxe sur les carburants	Tarification de l'usage
Financement de l'infrastructure				
Entretien et exploitation				
Externalisation de nuisances environnementales				
Gestion du trafic				

**Tab. 3-2 : Formes et objectifs de la tarification du transport routier**

Sur les grands axes autoroutiers, la tarification permet de financer la construction, la maintenance et l'exploitation de l'infrastructure. La tarification peut être utilisée pour taxer les effets externes du transport automobile, tels que l'émission du bruit et l'émission de gaz à effets de serre. En fin, elle constitue également un outil de gestion du trafic. Dans cette section, nous nous focalisons à analyser le dernier aspect : la tarification de la congestion.

Faisant face à la congestion, la tarification est un outil pour influencer les comportements de déplacement des automobilistes afin d'avoir une structure de demande raisonnable et de mieux répartir la demande dans le temps et dans l'espace.

Il existe quatre types d'application principaux :

- Tarification sur quelques voies d'une route : le péage est appliqué avec les tarifs variables ou non sur quelques voies séparées sur le long d'une autoroute : HOT lane, Express lane
- Tarification sur l'ensemble des voies d'une route : le péage fixe est traditionnellement appliqué sur les réseaux concédés, l'application du péage variable, notamment sur les périodes de départ de vacance peut inciter les usagers à prendre un autre itinéraire ou à partir plus tôt ou plus tard.
- Tarification par cordon : la tarification est appliquée aux usagers entrants une zone urbaine congestionnée (normalement d'un centre ville) d'une agglomération. Le tarif peut être fixe ou variable.
- Tarification sur l'ensemble des sections d'un réseau. Le tarif est calculé par km, fixe ou variable en fonction de la congestion.

### **Tarification optimale**

Tarif au montant du coût marginal. Au niveau temporel, nous distinguons trois stratégies : tarif fixe permanent, tarif variable par périodes et tarif dynamique en fonction des conditions du trafic

### **Problème d'acceptabilité**

L'équité territoriale (agrégée) : correspond au « principe de liberté » selon lequel la société doit assurer à chacun l'accès aux biens et services, évitant ainsi l'exclusion sociale et impliquant la reconnaissance d'un droit à la mobilité.

L'équité horizontale (procédurale) : correspond au « principe d'opportunités égales ». Elle suppose un traitement égal entre usagers utilisant un même service, ce qui implique aussi le principe de l'usager payeur, c'est-à-dire que la différenciation éventuelle des tarifs ne provient pas de la situation personnelle de l'usager.

L'équité verticale (état final) correspond au « principe de différence » qui explicitement prend en compte les inégalités de situation entre les groupes d'utilisateurs affectés et leurs conséquences par rapport aux transports.

Equité longitudinale (dynamique): qui correspond à l'objectif pour chacun de ne pas diminuer les bénéfices antérieurement disponibles. Elle correspond à une des principales difficultés lorsque l'on souhaite remettre en cause certains compromis institutionnels dans les sociétés modernes vieillissantes.

### **3.3.5.Allocation variable de voies**

#### **Le principe**

La demande de déplacement se compose normalement de plusieurs catégories de véhicule, chacune est soumise une certaine spécifique politique d'exploitation. Par exemple, dans certaines zones congestionnées, la circulation des poids lourds est interdite ou restreinte pour certaines périodes dans la journée ; les voitures à haut taux d'occupation et bus sont souvent priorités par rapport d'autres catégories.

Afin de mieux adapter l'offre de transport à la demande, notamment la variation à la demande en vue de différentes politiques d'exploitation, l'allocation de voies peut être modulée.

#### **Formes d'application**

- Voies réversible (Wolshon et Lambert, 2006)
- Nombre de voies variable (utiliser la voie auxiliaire comme voie supplémentaire (pour les TC) pendant la période de pointe)
- Voies sont réservées aux certaines véhicules : HOV lane, HOT lane, Express lane

## **Quelques cas d'application en France**

### *Voies réversibles*

Rappelons qu'en France, les premières affectations grâce aux « croix rouges / flèches vertes » datent de la fin des années 60 (JO de Grenoble, tunnel de Saint Cloud à Paris), et qu'il y a eu de nombreux autres cas depuis (autopont de Vienne, « vieux pont » de Givors, pont de Bordeaux, Gennevilliers, tunnel de l'Épine, etc.) ; tout cela pour utiliser une voie dans un sens ou dans l'autre, en fonction de la charge de trafic et des pointes du matin et du soir (notion de voie réversible).

Notons que l'affectation s'est faite grâce à des SAV (signaux d'affectation des voies), à l'exception de Gennevilliers ou de la route côtière de la Réunion, où on a utilisé un séparateur transposable.

Citons enfin le cas de la voie bus réversible de la montée des soldats à Lyon : une route dangereuse à 2x2 voies a été transformée en une route à deux fois une voie, avec une large voie centrale, réversible, et dédiée aux transports en commun.

### *Variation du nombre de voies dans le même sens*

Pour se limiter au cas de la région parisienne, le Siser (maintenant Dirif) a travaillé sur deux cas particulièrement intéressants, les troncs communs de A86 avec A3 et A4 où les surcharges de trafic sont particulièrement importantes :

- Sur le TC (tronc commun) A3 x A86 : La BAU a été supprimée pour offrir une voie supplémentaire à la circulation générale ; en cas d'incident, détecté en temps réel grâce à une DAI par analyse d'images vidéo, il était prévu que cette BAU soit « reconstituée » grâce au déploiement de biseaux de rabattement automatiques (BRA) ; après plusieurs chocs les BRA endommagés n'ont pas été remplacés, et les 5 voies (4V+BAU) restent en permanence ouvertes à la circulation.
- Sur le tronc commun A4 x A86 : Il s'agit là d'ouvrir à la circulation une voie auxiliaire, lors des forts trafics et si les conditions de sécurité le permettent ; le reste du temps cette voie auxiliaire doit assurer les fonctions de BAU, et rester libre pour les véhicules en panne ou accidentés. Le Siser tient beaucoup au fait que le statut de cette voie ne soit ni celui d'une BAU ni celui d'une voie circulée, mais plutôt d'un objet nouveau à caractère dual (Desnouailles, Boillon *et al.*, 2007).

### *Voie réservée aux transports en commun*

- A Grenoble, on a récemment expérimenté l'utilisation de la BAU pour la circulation des bus sur une bretelle de sortie de A48 fréquemment

saturée. Une étude détaillée a aussi été réalisée pour réserver une voie aux bus le long de l'autoroute sur un linéaire plus important ; elle compare différentes utilisations de l'emprise, en remplaçant la BAU par des refuges, avec des affectations variables ou des séparateurs fixes. L'ouverture d'une voie réservée pose des problèmes de sécurité spécifiques, liés aux différences de vitesses pouvant être pratiquées sur des voies adjacentes. Une extension à une section complète d'autoroute, comprenant notamment un échangeur, devrait être réalisée en 2007 (Desnouailles, Boillon *et al.*, 2007).

- • Sur la A 630 (Pont d'Aquitaine à Bordeaux) la mise à 2x3 voies (d'ici 2006) de largeur réduite avec suppression de la BAU, oblige à une exploitation stricte, en particulier pour la gestion des incidents/accidents, la mise en place d'un contrôle automatisé à 70 km/h, et l'interdiction du dépassement des PL.
- Ordinairement, l'affectation des voies est faite grâce à des SAV (croix rouges / flèches vertes). Toutefois il existe d'autres possibilités, comme par exemple le cas de la VRU de Chambéry : la voie du milieu de la VRU est affectée, à la demande, soit à la « filante » vers Aix par la RN, soit à la sortie vers l'autoroute A43 (en plus de la voie de droite, affectée en permanence à la sortie). Il n'y a pas de signalisation horizontale variable ; par contre, la partie centrale de la signalisation directionnelle sur portique, est réalisée à l'aide de prismes, dont le fond est vert ou bleu, de manière à ce que l'autoroute puisse être « alimentée » soit par une seule voie, soit par deux voies.
- Citons encore le cas de l'exploitation du tunnel du Siaix, en Savoie, et l'exploitation sous chantier du tunnel des Monts, à Chambéry (Savoie).

### 3.3.6.Guidage des usagers par information

La hiérarchisation des réseaux routiers présentée dans la section §3.2.4 est pour l'objectif de mieux adapter l'infrastructure aux conditions du trafic. Certaines sections de route sont conçues et exploitées de manière particulière pour mieux écouler les flux de trafic spécifiques et minimiser les nuisances dues au trafic : par exemple itinéraire autoroutier, itinéraire de poids lourds, etc. Il s'agit des itinéraires exploitants (cf. §2.3.2). Pour un couple origine-destination donné, l'itinéraire exploitant, avec le système de signalisation directionnelle est pour objectif de mieux drainer le trafic de l'origine vers la destination (plus rapide à quantité plus importante possible).

Le principe « sans ambiguïté » de la signalisation engendre un usage intensif de l'itinéraire principal qui facilite la maintenance et l'exploitation du réseau routier. Cependant, l'itinéraire exploitant n'est optimal qu'aux conditions « normales » du trafic. Lors des périodes de pointes, des grandes immigrations saisonnières ou des incidents/accidents perturbant l'itinéraire principal, il nécessite de retirer

une partir du trafic vers un itinéraire alternative pour assurer la fonction optimal de l'ensemble du réseau.

### Itinéraire Bis

En parallèle un itinéraire accueillant de grandes immigrations saisonnières (par exemple A6, A7 dans la vallée du Rhône, A9 dans le Languedoc), un itinéraire alternatif, appelé itinéraire Bis, peut être préparé pour partager une partie du trafic de l'itinéraire principale. Cet itinéraire Bis est jalonné de manière spécifique et permanente sauf le site d'entrée, qui est ouvert seulement en cas de besoin. Les tracés d'itinéraire Bis sont également marqués sur les cartes papiers ainsi que les cartes électroniques. Il s'agit des itinéraire assez longs, parfois allers jusqu'à plusieurs centaines km.

La mise en œuvre une telle mesure nécessite d'abord un itinéraire alternatif de capacité et de caractéristiques adaptées, offrant un niveau de sécurité de confort acceptable. Puis il faut considérer également le problème d'acceptabilité par les collectivités locales.

Au niveau de gestion du trafic, il nécessite une surveillance en temps réel des conditions de circulation sur l'itinéraire principal et itinéraire Bis pour calculer les périodes d'ouverture et de fermeture du itinéraire Bis. L'ouverture et la fermeture de l'itinéraire Bis doit être informé aux usagers par la radio trafic, par un PMV en amont ou par la carte en temps réel Bison-Futé.

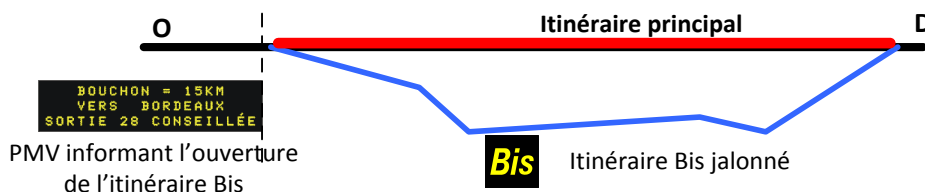


Fig. 3-11 : Illustration d'un itinéraire Bis

Comme l'exploitation d'itinéraire Bis n'est pas une mesure de contrôle du trafic donc n'est pas prescriptive, les effets de cette exploitation dépendent des comportements des usagers face à l'information diffusée donc dépendent de la manière donc l'information produite et diffusé.

Lors de congestion sur l'itinéraire principal, l'exploitation d'itinéraire Bis est toujours utile pour l'itinéraire mais pas pour le réseau secondaire exploité. Le trafic détourné peut créer des nuisances environnementales sur le réseau local qui n'est pas conçu pour recevoir du trafic intensif et rendre disfonctionnement au système de contrôle du trafic local. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de préparer un plan de gestion du trafic intégré de deux réseaux principal et local.

### Itinéraire S

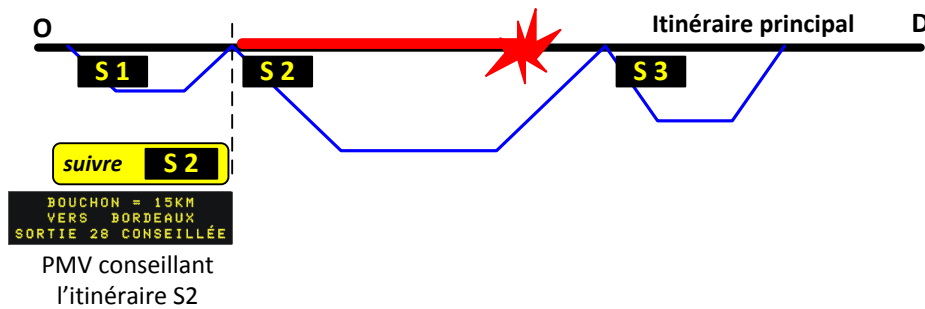


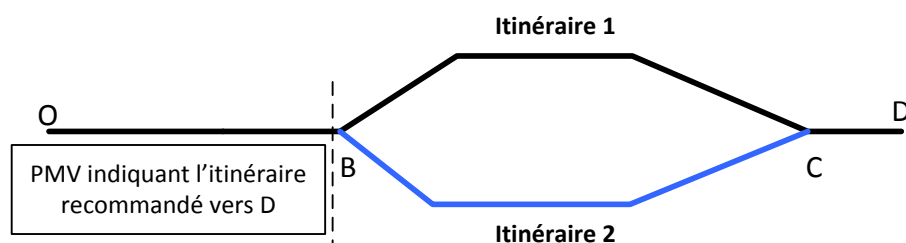
Fig. 3-12 : Illustration des itinéraire S

L'exploitation des itinéraires S porte une idée similaire que celle d'itinéraire Bis. Mais là, il s'agit des itinéraires plus courts et souvent multiples. Cette mesure peut être appliquée pour des tronçons d'autoroute ou de voie rapide urbaine sur lesquelles il y a une partie importante des usagers habitués et il y a fréquemment des perturbations.

L'itinéraire déviation se repose sur le même principe mais elle est utilisée dans le cas de travaux sur l'itinéraire principal.

### Itinéraires variables

L'exploitation « itinéraires variables » peut être appliqué à une liaison O-D lié par deux itinéraire ordinairement concurrents, c'est-à-dire les temps de parcours voisins. Entre B et C, la ville D est jalonnée sur les deux itinéraires mais à un instant donné, le seul itinéraire, où les conditions de circulation sont les meilleures, est effectivement signalée grâce à un panneau de direction variable placé en B.



Evidemment, ce type d'opération exige d'un recueil et un traitement des données de trafic suffisamment performants pour apprécier les conditions de trafic sur les deux itinéraires. Cette mesure est déjà appliquée sur le réseau des voies rapides en île de France sur lequel le réseau est maillé et le système de gestion du trafic en temps réel SIRIUS est suffisamment performant.

### 3.3.7. Le lien entre exploitation et information aux usagers

Comme avoir précisé, les mesures d'exploitation peuvent être classées en deux catégories : approche offre et approche demande. L'approche offre, qui comprend les mesures de contrôle de trafic, donne des prescriptions directes aux usagers tandis que l'approche demande, qui comprend la tarification, et information routière, tente à influencer le comportement économique des usagers. Le Tab. 3-3 présente une comparaison entre l'approche offre et l'approche demande dans l'exploitation du trafic.

	<i>Approche offre</i>	<b>Approche demande</b>
Influence	Influence l'offre	Influence la demande
Restriction	Restrictif aux usagers	Non-restrictif aux usagers
Obéissance	Totale obéissance des voyageurs	Partielle obéissance des voyageurs
Objectif	Améliorer l'offre du réseau	Rendre un choix plus raisonnable qui contribue à améliorer la situation de l'individu et la performance du réseau

**Tab. 3-3 : Comparaison approche « offre » et approche « demande »**

Les Tab. 3-4 et Tab. 3-5 présentent un résumé synthétique des mesures d'exploitation du trafic plus le lien entre les mesures d'exploitation du trafic et l'information aux usagers. Pour les mesures de contrôle de trafic, l'information aux usagers ne joue que le rôle complémentaire en améliorant le confort et l'acceptabilité des usagers. Au contraire, pour les mesures de l'approche offre, l'information joue un rôle essentiel (pour la tarification dynamique) voir principal (le guidage par information).

<i>Mesure</i>	<i>Objectif</i>	<i>Stratégie</i>	<b>Problématique</b>
Feux à intersection	Réduire les conflits entre les différents débits	Attribuer un temps admissible à chaque débit entrant	- Temps d'attente des véhicules - Piétons - TC, d'autres modes - Coordination
Régulation d'accès	Maintenir l'écoulement du trafic de la section principale à l'état optimal	Stocker les véhicules sur le réseau auxiliaire (bretelles)	- Espace de stockage - Acceptabilité - Coordination des entrées
Régulation de vitesse	Maintenir l'écoulement du trafic à l'état optimal	Stocker les en amont du bouchon (bretelles)	Information aux usagers Control
Allocation variable	Adapter l'offre à la demande	- Utiliser la BAU pour certaine période - voie réversible	- Sécurité - Acceptabilité - Débordement des zones voisinages
Tarification (à la	Financer/Réduire la demande/ Mieux	Introduire le système de péage	- Acceptabilité - Redistribution de



congestion)	répartir la demande dans l'espace et dans le temps		recette
HOV lane	Favoriser certaines catégories de véhicules	Créer une des voies réservées aux certaines catégories de véhicules	- Sous utilisation de la voie - Acceptabilité des usagers Control sanction
HOT lane (Express land)	Favoriser certaines catégories de véhicules +véhicules payants	- Créer une des voies réservées aux certaines catégories de véhicules	- Acceptabilité - Control sanction
Par itinéraire	Mieux répartir	- Itinéraire Bis - Itinéraire S - Itinéraire	

**Tab. 3-4 : Résumé des mesures d'exploitation**

Mesure	Données	A calculer	Support d'information
Feux à intersection	- Sans données - Données historiques - Données en temps réel	- Diagramme de feux optimal	- Feux
Régulation d'accès	- Données historiques - Données en temps réel	- Débits entrant autorisés - DAI-DAB sur la section courante	- Feux - PMV indiquant les événements routiers
Régulation de vitesse	- Données (vitesse observée) en temps réel	- Vitesse autorisées - DAI-DAB	- SAV - PMV
Allocation variable	- Données dynamique - Détection incident/accident	Le déclenchement et / - des différents plan du trafic	
Tarification (à la congestion)	- Données historiques - Données en temps réel	- Tarif optimal (par périodes) Ou tarif optimal en temps réel	-PMV
HOV lane	- Données statiques - Données dynamique	Efficacité (l'utilisation de la voie dédiée, est-ce qu'elle est sous-utilisée)	-Divers - D
HOT lane (Express land)	- Données statiques/ Données dynamiques	- Tarification optimale pour l'écoulement du trafic >> tarif élevé> sous-utilisation de la voie Tarif faible >> la voie ne fonctionne pas de manière optimal	Panneau de signalisation PMV D'autre - Temps de parcours
Guidage des usagers par information	- Données historiques - Données en temps réel		

**Tab. 3-5 : Lien entre les mesures d'exploitation du trafic et l'information aux usagers**

### 3.4.RECUEILLEMENT DE DONNEES

Dans cette sous-section nous discutons plus profondément sur le recueillement de données pour l'exploitation du trafic. Quelles sont les données nécessaires pour l'exploitation du trafic ? Comme avoir discuté précédemment, un réseau routier avec son trafic n'est pas un système ou un objet invariable dans le temps. Le réseau routier est étendu dans l'espace, son fonctionnement est toujours conditionné par plusieurs facteurs. Il s'agit d'abord des facteurs humains (la demande de déplacement, le comportement de conduite, etc.), les conditions météorologiques et environnementales, de l'exploitation du trafic, etc. et des perturbations aléatoires qui se produisent très souvent sur la route. Pour pouvoir gérer et exploiter efficacement le réseau et le trafic routier, l'exploitant doit savoir les flux de trafic sur le réseau. Dans cette section, nous présentons en premier temps les variables de base employées dans le domaine de l'exploitation du trafic routier, à la fois dans l'opération et l'étude de trafic. Et puis, nous décrirons les méthodes et techniques utilisées pour le mesurage de trafic. En fin, nous rappelons les méthodes de vérification et de validation des données recueillies.

#### 3.4.1.Données pour l'exploitation du trafic

Une base de données pour l'exploitation du trafic se compose typiquement de plusieurs couches : La description de l'infrastructure et des équipements, celle de du trafic et celle de la demande.

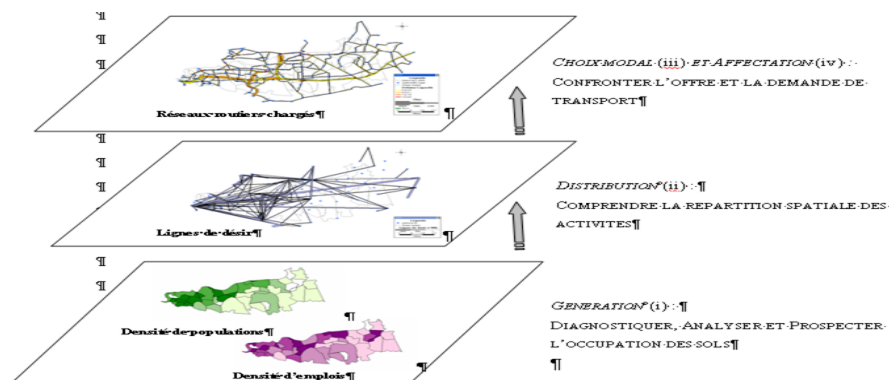


Fig. 3-13 : Structure d'une base de données pour l'exploitation du trafic

#### Le réseau et les équipements

La représentation de la géographie du réseau routier dépend fortement du niveau d'agrégation de la cartographie : modélisation macroscopique ou celle microscopique. Dans une modélisation macroscopique, les objets élémentaires sont chaînon et nœud. Un chaînon décrit un segment routier. Il est délimité par deux nœuds qui correspondent aux intersections en amont et en aval. Les principales informations sont la position géographique des nœuds, les

caractéristiques de chaque chaînon (longueur, type de voie, nœud en amont et en aval, etc.). Dans une modélisation microscopique, le réseau est représenté de manière plus détaillée : la géométrie de la route et des intersections sont prise en compte.

La description des équipements routiers comprend la localisation et les caractéristiques fonctionnelles des équipements, en particulier, les équipements de comptage et de contrôle du trafic.

## **Le trafic**

Du à sa complexité, le trafic ne se décrit que par nombreuses variables, catégorisées en trois groupes : variables de base du flux, variables économiques et d'exploitation, événements routiers.

### *Les variables de base de flux de trafic*

Dans la théorie de trafic, trois variables macroscopiques de base pour comprendre l'écoulement du trafic d'une section routière sont débit, vitesse et taux d'occupation. Cependant, l'étude et l'exploitation exigent non seulement la connaissance sur le trafic local mais aussi la connaissance sur le trafic au niveau d'axe, d'itinéraire et de réseau, en particulier des variables portant à la fois des propriétés physiques et économiques, comme la perception des usagers de la route.

- Débit : le débit représente le nombre de véhicules ayant franchi un point entre deux instants donnés. On distingue plusieurs types de débit : débit « 6 minutes » débit par tranche d'horaire, débit moyen journalier, etc. Cette grandeur physique est mesurable par bouche de comptage ou d'autre dispositif d'observation
- Concentration : cette variable exprime la répartition des véhicules dans l'espace. Elle représente le nombre de véhicules présents à un instant donné sur une longueur unité d'une voie ou de l'ensemble des voies d'une route. Cette grandeur est directement observable par photographie aérienne ou par caméra vidéo mais elle est souvent évaluée à travers une autre variable aisément mesurable appelée : taux d'occupation.
- Taux d'occupation : le taux d'occupation est défini par la proportion de temps durant laquelle la boucle est occupée, il est directement lié à la concentration. Cette variable est très couramment utilisée dans le domaine de l'exploitation du trafic car elle peut être facilement et directement mesurée par des capteurs-boucles magnétiques implantés sur la chaussée.

### *Variables économiques et d'exploitation*

En addition de trois variables de base présentées ci-dessus, les autres variables sont également utilisées, en particulièrement des variables portant certaines

propriétés économiques, telles que capacité, vitesse, temps de parcours, coefficient d'équivalence, etc.

- **Capacité** : la capacité d'une section de route est définie comme le nombre maximal de véhicules pouvant être écoulés sur une section routière pendant dans une période déterminée. Elle est bien sûr caractérisée par les caractéristiques physiques de l'infrastructure (l'aménagement géométrique, la qualité de revêtement) et également par les conditions environnementales (météorologie, visibilité), par la composition du trafic (le rapport PL, VP par exemple). Il est difficile d'appréhender l'effet de chacun de ces facteurs sur la capacité. Ainsi, on utilise souvent la notion de capacité pratique qui correspond plutôt à un débit horaire moyen de saturation. La capacité d'une section homogène peut être estimée à l'aide de plusieurs approches : l'ajustement des courbes taux d'occupation – débit – vitesse grâce au diagramme fondamental ; ou l'analyse empirique des données d'observation : la valeur moyenne des maxima de trafic observé fournit une estimation du débit de capacité.
- **Temps de parcours** : avec sa propriété économique, le temps de parcours est une des variables les plus utilisées dans la prise de décision autant du côté de l'exploitant que du côté des usagers. On distingue les types de temps de parcours, telle que : temps de parcours instantané, temps de parcours moyen, temps de parcours prévu, temps de parcours réalisé, etc.
- **Vitesse** : à l'inverse des variables présentées ci-dessus, qui sont relativement abstraites pour l'utilisateur, la vitesse est une grandeur qui permet de percevoir directement les conditions de circulation sur son trajet. La vitesse d'un mobile est définie comme la distance qu'il parcourt pendant une unité d'intervalle de temps. En pratique d'exploitation routière, on ne traite plusieurs variables de vitesse : vitesse instantanée, vitesse moyenne temporelle, vitesse moyenne spatiale, vitesse moyenne d'écoulement, vitesse moyenne praticable.
- **Coefficient d'équivalence** : le trafic est typiquement composé de plusieurs catégories de véhicules, par exemple des voitures particulières, les poids lourds. Ce coefficient permet de définir les débits en unités de voitures particulières u.v.p au moyen.

### *Information sur les événements*

Les conditions météorologiques, en particulier la neige et l'inondation, peuvent évidemment dégrader partiellement ou totalement la circulation routière. De plus, les événements socio-économiques jouent un rôle important dans la génération du trafic : une grève, une manifestation ou des travaux peuvent réduire la capacité de circulation dans certaines parties du réseau ; la demande est beaucoup plus forte pendant les périodes de vacances. L'obtention des

informations concernant l'environnement permet l'exploitant de préparer des moyens nécessaires et y intervenir.

### **La demande en matrice O-D**

Dans le domaine de l'ingénierie du trafic routier, la demande de déplacement est essentiellement définie par le nombre de personnes (ou de véhicules) souhaitant se déplacer entre un point de départ (nommé origine) et un point d'arrivée (nommé destination).

L'ensemble des demandes déplacement est représenté en matrice, appelé la matrice O-D de la demande. Pour un couple O-D, la demande peut être simplement un chiffre signifiant le nombre total, ou être temporisé : le profil de demande de déplacement pendant une heure, la journée, l'année ou une période spécifique.

La matrice O-D peut intégrer éventuellement de l'information concernant la structure de la demande, telle que les différentes catégories de trafic, les caractéristiques et les préférences individuelles d'utilisateur qui influence les choix de déplacement, notamment la valeur du temps, la situation professionnelle et familiale, la captivité d'un certain mode de déplacement, etc.

Par leur complexité, les variables de la demande est pratiquement inobservable directement (sauf la lecture automatique des plaques). Elles sont donc calculées à partir des données de trafic par des méthodes d'estimation des matrices O-D ou à partir des enquêtes questionnaires par exemple enquête ménages de déplacements (EGT en île de France), enquête références déclarées ou enquête références révélées.

### **3.4.2. Outils et méthodes de mesure**

Parmi l'ensemble des données exigées pour l'exploitation routière, les données du réseau et des équipements sont peu variables et ne sont pas mises à jour fréquemment, les données d'environnement sont recueillies à partir de diverses sources. Dans cette section nous nous focalisons aux outils et méthodes de mesures de trafic.

#### **Capteurs de comptage de trafic**

Actuellement, il y a quinzaine constructeurs ou distributeurs dans le marché d'équipement en observation du trafic routier qui sont capables de répondre des différents besoins (infos trafic, mesure de temps de parcours ou observatoire en chantier) sur plusieurs niveaux budgétaires en s'appuyant sur des diverses technologies de détection et de communication.

Selon les conditions d'implantation, nous distinguerons principalement deux types de capteurs : les capteurs intrusifs qui sont posés dans la chaussée ou solidaires sur la chaussée ; les capteurs non-intrusifs qui se posent hors sol, en hauteur sur support. Sur le tableau ci-dessous, nous listons tous les capteurs utilisés dans ce domaine en comptant tenu des évolutions techniques :

Capteur	Description	Données mesurées	Avantage - Inconvénient
Tube pneumatique	Un tube creux en caoutchouc tendu en travers de la voie mesurant la pression aux passages des essieux.	- débit	(+) portabilité, installation facile, autonomie (-) imprécision en trafic perturbant, manutention sur voie, fonctionnement influencé par la météo, non-durabilité
Boucle électromagnétique	Une boucle inductive, noyée dans la chaussée, le passage de la masse métallique au dessus de la boucle provoque une variation du champ électromagnétique.	- débit - vitesse (avec double boucle)	(+) coût, durabilité, éprouvé, précision en débit, fonctionnement indépendant de la météo; (-) implantation difficile, réglage/maintenance.
Capteur piézo-électrique	Un câble piézo-électrique noyé dans un barreau de résine coulé dans la chaussée, il fournit une tension électrique variable en fonction de la force impliquée dessus.	- Silhouette - poids par essieux - poids total dynamique	(+) mesurage de poids dynamique (-) implantation difficile
Plaque magnétique	Un capteur autonome sans fil qui se fixe au milieu des voies.	- débit - vitesse	(+) application temporaire (-) manutention au milieu des voies
Détecteur acoustique ultrasons	Mesurer le taux d'occupation en émettant et recevant des ultra-sons	- Débit - Taux d'occupation	(+) précision sur la mesure de distance, maintenance facile (-) fonctionnement influencé par la météo
Détecteur acoustique	Mesure la vitesse en enregistrant et analysant les bruits émis par le véhicule passant.	- Débit - Vitesse	(+) coût moins élevé, installation et maintenance facile (+) moins précision pendant le trafic perturbé.
Radar Doppler-Fizeau	Mesurer la vitesse instantanée de véhicule par en émettant et recevant une onde électromagnétique.	- Vitesse instantanée - Contrôle de vitesse	(+) installation facile, bonne précision (-) faible précision en débit perturbé par le problème de marquage des véhicules
Vidéo	Prise de vue et traitement des pixels.	- Débit - Vitesse - Taux d'occupation - DAI, DAB	(+) Bonne précision pendant un trafic saturé, Multi-usage, DAI (-) Exigent en support de transmission, influencé par les conditions météorologique et de luminosité, mesure de vitesse non stable

**Tab. 3-6 : Les capteurs existant sur le marché français- Source : Cété Normandie, « les outils de recueil de données de trafic routier »**

Constatons que les boucles de comptage fonctionnent bien pendant la perturbation pendant que la surveillance par vidéo fonctionne bien pendant la

saturation et pour la détection des incidents. C'est pourquoi dans certain cas, on combine deux types d'équipement.

Concernant l'installation, en fonction des besoins de comptage, les stations de comptage peuvent être installées de manière permanente ou temporaire. Les stations temporaires servent les recueils ponctuels ou la surveillance de chantier pendant que celles permanentes, liées à un réseau de communication, servent les recueils en temps réel ou en temps différé. La localisation des points de mesures afin de mettre en relation avec un référentiel routier

A noter que la technologie de vidéo et de lecture des plaques permet de reconnaître les véhicules en sanction et aussi d'établir la matrice O-D de la demande

### **Véhicules traceurs**

La pratique d'exploitation en temps réelle des réseaux autoroutiers et des voies rapides se pose pour une grande part sur l'utilisation des capteurs fixes, permettant de mesurer des caractéristiques des flux de trafic. Cependant les nouvelles technologies de communication sans fil ouvrent dans ce domaine. Au lieu d'utiliser des capteurs implantés sur la chaussée pour le comptage, on utilise directement les véhicules circulant sur la route pour mesurer les conditions de circulation – grâce à la technologie de géo-localisation – GPS. On qualifie en général de traceur tous les véhicules insérés dans un flot de circulation et susceptible identifié et localisé. Un système de véhicules traceurs est généralement constitué d'un certain nombre de composants : des véhicules, qui suivent le flot de circulation, embarqués d'un module de localisation et d'un système de communication avec un centre de traitement ; un média de communication, un système central étant en liaison avec les véhicules traceurs, chargé de recueillir et d'exploiter des données de position des véhicules recueillies. Les différents types de systèmes se distinguent par le mode de communication utilisée entre les véhicules et le dispositif :

#### *DSRC (Dedicated Short Range Communications)*

Le lien DSRC se présente comme un moyen de communication bidirectionnel autorisant une transmission de données sur une zone restreinte pour des échanges entre véhicules et infrastructures. La transmission est effectuée lorsqu'un véhicule équipé d'un badge passe sous une balise. Les balises capturent le numéro d'identification du véhicule. En suite, les données concernant la présence du véhicule, associé d'un temps, de l'identité de la balise réceptrice sont transmises à un poste de gestion central où elles sont stockées ou traitées en temps réel.



Cette technologie rend des informations précises avec un bon taux de détection mais seulement dans la limite des véhicules et des infrastructures équipées qui exige d'un investissement important.

#### *GPS (Global Positioning System)*

Le système de positionnement dynamique par satellites permet de déterminer la position d'un mobil, sa vitesse et sa direction de déplacement. Ce service porte des grands avantages par son large couverture (niveau mondial) et sa simplicité d'utilisation (faible coût de service et d'équipement, pas exigence au niveau d'équipement d'infrastructure). Cependant, l'imprécision de la mesure est surtout liée à la qualité militaire ou civile de l'utilisateur. La précision alors accessible en temps réel est limitée à 100 m dans 95% des cas. Il est possible d'améliorer la précision de positionnement en utilisant une technique différentielle (DGPS ou DGLONASS).

#### *GSM (Global System for Mobile communications)*

Cette technologie est basée sur les transmissions de type radio numérique utilisées par les réseaux de téléphonie mobile dont la norme la plus commune est le GSM. Elle offre la possibilité de localiser un mobile par triangulation entre les différentes stations BTS qu'il connecte. Cette technologie porte des avantages importants : un faible coût car elle n'exige pas d'équipement spécialisé à installer ; un taux d'équipement important car la plupart des usagers routier disposent d'un téléphone portable ; une couverture large (national). Cependant, la précision de localisation donnée par cette technologie est faible, elle dépend d'aussi la densité des stations BTS installées (parfois quelques km)

Le recueillement des données par véhicules traceurs permet de connaître en temps réel ou différé d'une part l'écoulement du trafic (la vitesse, le temps de parcours par O-D) et d'autre part la demande de déplacement par O-D et la répartition du trafic entre les itinéraires concurrents. Cela sert à la préparation de la gestion du trafic ainsi que le traitement et la régulation des flux de trafic en temps réel.

La plupart des applications en véhicules traceurs sont à titre expérimental. A côté des problèmes techniques à résoudre, il existe aussi des contraintes relatives à la protection de la vie privée. Un autre problème posé est la représentativité des flots de véhicules car les véhicules traceurs (taxi, bus, etc.), qui circulent sur des voies réservées ou des itinéraires particuliers, ne portent pas les mêmes caractéristiques que l'ensemble du trafic.

Citation : projet Mobile Millenium à Berkeley tente à utiliser les téléphones mobiles comment des capteurs de trafic pour la gestion dynamique du trafic.

## **Enquête**

### *Enquête ménage de déplacement*

Une enquête faite à l'échelle de l'agglomération auprès des ménages qui permet de connaître des déplacements réalisés par les habitants d'un périmètre donné pendant un jour type déterminé, par exemple EGT (Enquête Globale de Transport) en Île-de-France

### *Enquête références déclarées*

Les préférences déclarées (stated preferences - SP) : « toute famille de techniques qui utilisent les réponses des individus concernant leurs préférences sur un ensemble d'options possibles de transport afin d'estimer leur fonction d'utilité » (librement traduit de (Kroes et Sheldon, 1988)). Ainsi est-il demandé aux usagers d'effectuer un choix hypothétique - par classement ou choix de l'item préféré – à partir d'un questionnaire. Le questionnaire présente différentes caractéristiques de service dont on fait varier l'intensité et / ou le niveau (variation du prix du service de transport en fonction d'un niveau également variable de services proposés). Cette méthode permet de fournir des données adaptées car conçues pour un contexte étudié, à la différence des données de type préférences révélées.

### *Enquête références révélées*

Les préférences révélées peuvent être définies comme une famille de techniques qui estiment la demande de trafic en se basant sur des données issues de l'observation directe ou issue d'enquêtes concernant les comportements effectifs de choix : « la comparaison des alternatives de transport choisies et des alternatives rejetées révèle les préférences des usagers » (librement traduit de (Kroes et Sheldon, 1988)). Ces données issues de l'observation directe des comportements sont utilisées pour inférer les fonctions d'utilité implicites des usagers (Kroes et Sheldon, 1988). Ces enquêtes visent à éclairer la demande en quantité et également en structure (Denant-Boémont, 2003) (Denant-Boémont, Willinger *et al.*, 2002)

### **3.4.3. Constitution d'une base de données**

Dans une base de données de trafic, nous distinguons les données historiques et les données en temps réel. Les données en temps réel (appelées également données dynamiques) sont mesurées, transmises, traitées et exploitées en temps réel. Après la séquence de temps, les données historiquement dynamiques sont archivées et considérées comme données historiques.

En effet, le trafic présente un caractère journalier et/ou saisonnier car il est souvent productible d'un jour à l'autre. Les données historiques servent à pallier

le manque d'information ou pour assurer une continuité de la chaîne de données (qualification des données, prévision des états du trafic) :

Des données qui présentent des jours standards de circulation, c'est-à-dire qu'en situation normale, le trafic peut être reproductible d'un jour à l'autre. Ces données sont considérées comme statique car elles ne s'évaluent pas ou très s'évaluent très lentement.

Une ou plusieurs matrices qui permettent d'identifier la demande de mobilité des usagers sur un réseau routier. Une matrice O-D est réalisée en général par enquêtes terrain pour connaître les déplacements journaliers des usagers. L'information contenue dans cette matrice est le nombre de véhicules circulant d'un origine vers une destination pendant pour une journée ou une heure déterminé. Les informations complémentaires peut-être sont le taux de répartition sur une intersection, le temps de parcours sur certains itinéraires particuliers.

L'exploitation et la réalisation des études de trafic nécessitent de disposer de données en différents niveaux de agrégation en fonction du problème à traiter : mesures agrégées sur 20 secondes, 1 minutes, 6 minutes, 1 heure, 1 jour :

- Les données 20s sont utilisées principalement pour la DAI et DAB ;
- Les données 1mn sont nécessaires pour le calibrage des paramètres du diagramme fondamental ;
- Les données 6mn sont utilisées pour les traitements statistiques.

### **3.5.TRAITEMENT DE DONNEES**

La fig. 3-12 présente une procédure de traitement de données du trafic typique. Après leur recueillement et leur transmission, les données brutes de trafic doivent être qualifiées. La qualification de données, pour assurer que les données erronées ne seront pas utilisées pour l'exploitation du trafic, est effectué par plusieurs tests, notamment des teste de cohérence temporelle et partiale. Une fois que les données soient qualifiées, elles font partie d'une base de données comprenant les données historiques, les données en temps réel (récemment recueillies et qualifiées) et les événements routiers prévisibles. En suite, le traitement de ces données nous permet de construire les profils de référence du trafic, de caractériser l'état actuel du trafic ou de prévoir les conditions de trafic à certaine horizon.

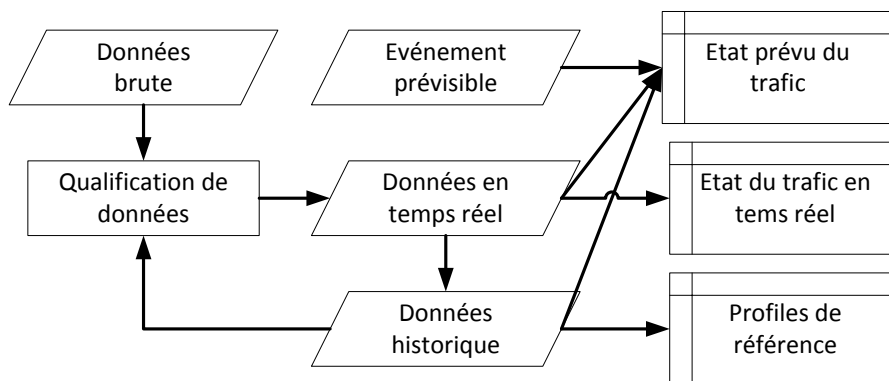


Fig. 3-14 : Procédure de traitement de données

### 3.5.1. Qualification des données

La maîtrise de la disponibilité et de la qualité des données dynamiques dans la base de données locale est un problème important dans les systèmes modernes de traitement des données de trafic. La qualification des données assure que des données erronées ne sont pas utilisées dans l'estimation ou la prévision. En pratique, les problèmes proviennent soit d'un mauvais fonctionnement des postes de mesure, soit d'une erreur de transmission ou d'une situation de trafic incongrue. A ce jour, peu de méthodes se sont intéressées à la qualité des données de trafic. Quelques techniques décrites dans la littérature, utilisent des algorithmes basés sur la vérification de la cohérence des mesures et proposent une méthode de correction en cas d'anomalie.

Elle vérifie, en temps réel, la cohérence des observations faites par les postes de mesure et remédie aux pannes de recueil des données de trafic. Le taux d'erreur de mesure est non négligeable dans les sites d'exploitation. En effet, il est fréquent de trouver des taux d'erreur de 5% ou plus dans les systèmes de recueil de données actuels (Bréheret, Schettini *et al.*, 2000). Ces erreurs proviennent essentiellement de pannes de transmission entre le poste de mesure et le système de recueil ou directement la mise en alarme du poste de mesure lui-même. D'autres erreurs s'expriment par le fait que les postes de mesure peuvent fournir des mesures aberrantes. Il est très important de détecter et corriger les observations du trafic et de remplacer les valeurs anormales le cas échéant.

Le principe de la qualification des données de comptage revient à décompresser le processus en deux étapes (Cleghorn, Hall *et al.*, 1991), (Mingyu, 1995) :

- Détecter les données erronées fournissant un journal d'alarme des postes de mesure
- Reconstituer des données manquantes ou aberrantes.

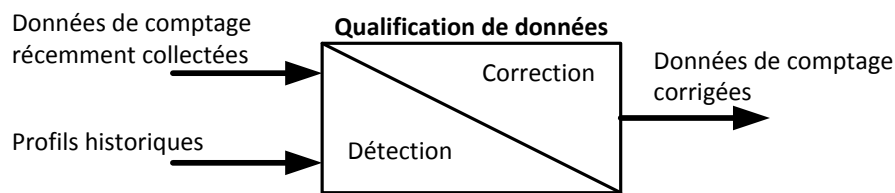


Fig. 3–15 : Processus de qualification des données

Ce processus est activé à chaque nouvelle période d'échantillonnage pour des postes de mesure. Le principe de base de tout redressement de données est que l'information continue dans la base de données est fortement redondante (pour les échantillonnages de faibles séquences consécutives).

- Test 0 : La procédure de détection des données manquantes, qui correspondent essentiellement à des pannes du système de détection ou à des pertes de données lors de transmission, reviennent à détecter des valeurs particulières indiquant que le poste de mesure est en alarme ou à vérifier que les variables macroscopiques sont en dehors d'un intervalle admissible. La mesure admissible doit être à l'intérieur d'un intervalle. Par exemple : chaque variable débit, vitesse, taux d'occupation doivent non-négative et inférieur à une valeur maximale. La détection des données aberrantes issues d'un rebond de détecteur ou des problèmes de télécommunication, etc. est plus délicate car il faut faire la différence entre une mesure qui ne correspond à aucun phénomène physique et la mesure d'un phénomène exceptionnel. La solution envisagée ici réside dans la redondance de l'information disponible : il n'est raisonnable de penser qu'un phénomène de trafic ne peut se produire isolément dans le temps et l'espace. On considéra comme aberration de mesure toute variation significative se produisant : pendant une seule période de mesure, ou en un seul point
- Test 1 : une vérification temporelle des données est effectuée pour assurer que les nouvelles mesures sont cohérentes par rapport aux dernières mesures enregistrées.
- Test 2 : une vérification spatiale détermine si la variation est simplement locale au poste de mesure où si celle-ci est observable sur les postes voisins de celui considérés.
- Test 3 : ce test vérifie si la donnée respecte les lois du trafic.

En parallèle de la détection des erreurs, la correction des mesures erronées est effectuée dans le cas qu'il le faut. La correction peut être de trois natures :

- Pour une donnée manquante (test 0), on la remplace dans un premier temps par son estimateur temporel.
- Pour une donnée ne satisfaisant pas à la fois les tests 1 et 2, on la remplace par son estimateur spatial. Il faut noter que une donnée ne

satisfaisant pas le test 1 mais satisfaisant le test 2 signifie un cas exceptionnel du trafic.

- Pour une donnée ne satisfaisant pas le test 3, on la remplace par sa projection sur la courbe.

Le schéma ci-dessus présente sommairement un algorithme de détection et correction des données de trafic (Bréheret, Schettini *et al.*, 2000).

### 3.5.2. Détection automatique des incidents

« Un incident désigne un événement aléatoire (non-prévisible) qui réduit la capacité de la route ou dégrade le niveau de sécurité ». Malgré que la parution d'un incident puisse être informée à l'opérateur par patrouillement, par appel d'urgence des usagers, la pratique d'exploitation routière exige de réduire le délai de notification de l'incident pour double raison. Au niveau de sécurité, la rapidité des interventions constitue naturellement un des facteurs clefs pour la sécurité des victimes. L'intervention des services de secours permet également d'éviter des incidents secondaires. Au niveau économique, la détection de l'incident permet les services de secours de débayer les objets bloquant le plus tôt possible. Cela contribue à réduire significativement le temps perdu ou le retard dû à l'incident (Cohen, 1990)

#### DAI par traitement des données

Les méthodes conventionnelles de détection automatique reposent sur des algorithmes utilisant des mesures acquises en temps réel. La forme la plus simple est de comparer une fonction de données à un ou plusieurs seuils pré-calibrés, par exemple l'algorithme californien (Payne, Helfenbein *et al.*, 1976). Cet algorithme vérifie la cohérence temporelle et spatiale des données sur les postes de mesures voisins et les séquences de mesure voisines. Une alarme est déclenchée lorsque les trois inégalités suivantes sont simultanément vérifiées :

$$OCC(i,t) - OCC(i+1,t) > T_1$$

$$\frac{OCC(i,t) - OCC(i+1,t)}{OCC(i,t)} > T_2$$

$$\frac{OCC(i+1,t-2) - OCC(i+1,t)}{OCC(i+1,t-2)} > T_3$$

Dans lesquelles,  $OCC(i,t)_1$  est le taux d'occupation mesuré au poste de mesure  $i$  à la séquence de temps  $t$  ;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  sont les paramètres à calibrer.

Dans des conditions de forte congestion, cette approche distingue difficilement un incident d'un bouchon récurrent car les boucles magnétiques de comptage, eux-mêmes ne fonctionnent pas tout à fait correctement dans ces conditions.

Une classification des principales approches utilisant des données des postes de mesure est présentée par (Cohen, 1994).

### **DAI par traitement d'image vidéo**

Grace à l'avancement en informatique et en télécommunication, les recherches dans ce domaine s'accroissent au cours des deux dernières décennies. L'avantage principal de cette approche est de permettre une surveillance spatiale de la zone étudiée. Par rapport à d'autres approches, elle permet l'exploitant de vérifier et d'identifier sur les images la nature de l'incident.

Les algorithmes de traitement d'image peuvent être classés en trois catégories :

- Tripwire : considérer la présence ou l'absence d'objets dans une zone donnée est dont le mouvement ou l'absence de mouvement est détectée.
- Tracking : fondé sur la recherche de formes par la détection préalable d'entités constituées de zones plus ou moins sombres.
- Utiliser des paramètres spatio-temporels pour caractériser l'utilisation de la route et identifier ainsi diverses modalités de trafic : fluidité, ralentissement, congestion, arrêt, etc.

Par rapport à l'approche de traitement de données de comptage, l'approche de traitement d'images vidéo porte certains avantages dans le cas de trafic dense. Cependant, le fonctionnement de ce genre de système dépend des conditions météorologiques, notamment des conditions de lumière.

### **DAI par véhicules traceurs ou communication véhicule-infrastructure**

Prometteuses malgré en cours d'expérimentation, les technologies de véhicules traceurs ou de communication véhicule-infrastructure peuvent fournir en temps réel (cf. Projet Mobile Aluminium à Berkeley) la vitesse et le temps de parcours des véhicules traceurs qui font partie du flux. Cela permet de caractériser les conditions de trafic ainsi que de détecter les anomalies dans les flux de trafic.

### **Calibrage optimal des paramètres**

Pour un algorithme DAI quelconque, le calibrage doit être optimisé sur trois indicateurs de performance suivants :

- Le taux de détection, défini par la fraction du nombre d'incidents détectés sur le nombre d'incidents effectifs.

- Le nombre de fausses alarmes, par station de détection et par unité de temps.
- Le délai moyen de détection, défini par la durée de temps entre le moment de l'apparition de l'événement et le moment de la notification donnée à l'opérateur.

### 3.5.3.Caractérisation de l'état du trafic

#### Principe

La lutte contre la congestion est devenue, depuis longtemps, une des tâches principales de l'exploitation des autoroutes, en particulier des voies rapides. La notion de bouchon est un phénomène complexe. Les manières de percevoir ce phénomène sont variées entre les différents acteurs. Pour les usagers la notion de bouchon est plutôt qualitative, perçue à travers la vitesse, ou la durée totale sur un parcours données. Cependant, les ingénieurs du trafic et les exploitants du réseau ont besoin de déterminer ce phénomène de manière plus quantitative afin de pouvoir appliquer des mesures correctes. Il faut avant tout localiser spatialement et temporairement les bouchons à travers des variables macroscopiques du trafic (débit, vitesse, taux d'occupation) et leur relation.

En principe, l'état du trafic est caractérisé en différents niveaux en fonction de certaines variables. Nous présentons ici deux méthodes de caractérisation, appliqué aux Etats-Unis (Highway Capacity Manual 2000) et en France

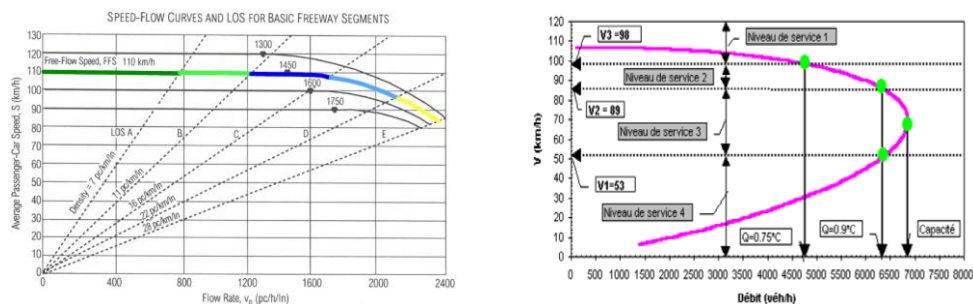


Fig. 3-16 : Les niveaux de services selon la méthode HCM 2000 et la méthode française

- LOS (Level of Service) dans HCM 2000 : les niveaux de services (LOS) sont classés en 5 niveaux, noté A, B, C, D, E, F en fonction de la concentration (voir la partie gauche de la fig. 3-8)
- NCS (Niveau de Service) dans la méthode française : les niveau (NCS) sont classés en 4 niveau, noté 1, 2, 3, 4 en fonction du débit pratiqué (par rapport la capacité) et la concentration (voir la partie droite de la fig. 3-8).

Le tab. 3-8 donne une comparaison entre les deux méthodes :



NSC	LOS
NSC 1	LOS A, LOS B
NSC 2	LOS C, LOS D
NSC 3	LOS E
NSC 4	LOS F

**Tab. 3-7 : Comparaison entre « Level of service » de HCM 2000 américain et niveau de service en France**

En complément aux méthodes décrites ci-dessus, l'état du trafic peut être également observé par le traitement des images capturées par des caméras de surveillance.

### Représentation synoptique

L'état du trafic sur un réseau est souvent représenté sous forme d'un synoptique qui affiche :

- L'état du trafic par section, légendé par la couleur affichée, par exemple section fluide-verte, section chargée-orange, section saturée-rouge.
- Les événements prévus ou imprévus sur chaque section de route sous forme d'icônes symbolisant le type d'événement.

Sur le site Bison-Futé, les événements affichés bénéficient d'un système de filtrage s'alimentant essentiellement auprès des CRICR, la totalité des informations saisies ne sont pas affichées. Ainsi, on ne retrouvera, sur les synoptiques, que les événements « perturbant », ayant un impact réel pour l'utilisateur de la route, l'objectif étant l'application et d'augmenter la lisibilité des informations projetées.

Malgré les méthodes de qualification présentées ci-dessus, le classement des états du trafic se pratique un peu différemment : seuls trois couleurs bleue, orange, rouge sont utilisées pour les états du trafic respectivement fluide, chargé et saturé.

### 3.5.4. Temps de parcours

#### Différentes notions de temps de parcours

Temps de parcours est défini comme le temps mis pour aller d'une origine à une destination. Le temps de parcours est un élément fondamental dans le domaine de gestion du trafic car il fournit une explication physique et économique compréhensible pour les différents acteurs. Il est donc une composante essentielle dans des études techniques et les analyses socio-économiques. Au contraire des variables microscopiques observées par les stations de comptage,

le temps de parcours est une variable qui porte à la fois la dimension spatiale et la dimension temporelle.

L'indication de temps de parcours est intéressante à la fois pour les usagers dans planification de leur déplacement, pour l'opérateur qui doit prendre des mesures de gestion du trafic et pour le décideur

### **Méthodes de calcul des temps de parcours**

Les méthodes de calcul des temps de parcours se sont beaucoup évoluées des dernières années avec l'apparition des mesures de gestion dynamique du trafic et les services d'information dynamique du trafic aux usagers. En fonction des données utilisées, il existe trois familles de méthodes suivantes :

- Conversion des données de comptage : le temps de parcours est calculé à partir des variables de base : débit, vitesse, taux d'occupation.
- Suivi des véhicules (véhicule traceur, lecture de plaque d'immatriculation)
- Combinaison des deux méthodes ci-dessus permettant d'améliorer la qualité de l'estimation.

Une revue en détail des méthodes de calcul de temps de parcours peut être trouvée dans (Certu, 2008).

### **3.5.5. Préviction du trafic**

Comme un déplacement est souvent étalé dans le temps et dans l'espace et les conditions de déplacement s'évaluent, la préviction du trafic est un point clé pour l'exploitation dynamique du trafic, en particulier le service d'information du trafic aux usagers. Selon les échelles de temps, nous faisons un classement des prévisions du trafic.

#### **Préviction à l'horizon de l'année (long terme) : sans prise en compte des événements**

La préviction du trafic Bison-Futé est un exemple typique de cette catégorie. Le service Bison-Futé produit la préviction des conditions du trafic pour chaque jour de l'année à partir des données de trafic de plusieurs années dans le passé. Cependant, cette méthode reste très grossière autant à l'échelle spatiale qu'à l'échelle temporelle car elle donne une seule indication pour l'ensemble du réseau national (par sens départ ou retour). Cette préviction exclut les événements routiers (cf. (Danech-Pajouh, 2003)).

Le site web du concessionnaire ASF propose une version plus évolutive de la préviction Bison Futé : la préviction des conditions du trafic est pour une section autoroutière choisie à une heure donnée.

Récemment, le projet TPM de l'INRETS tente à développer une méthode de prévision des temps de parcours permettant de prévoir le temps de parcours d'un déplacement en fonction de son O-D, son heure de départ et son jour de départ dans l'année, cf. (Danech-Pajouh, 2000; Danech-Pajouh et Scemama, 2009) ou (Allain, 2008).

Cette approche statistique pour la prévision de débit ou de temps de parcours se repose sur le même principe :

- Filtrage pour exclure les jours portant les événements perturbant au trafic
- Analyse statistique d'une base de données filtrée à partir des données de comptage de plusieurs années.

Apparemment, cette méthode ne fournit qu'une prévision sur la condition moyenne ou le temps de parcours moyen : les perturbations ne sont pas prises en compte.

#### **Prévision à l'horizon de quelques jours (moyen terme) : prise en compte des événements prévisibles**

Les événements routiers prévisibles sont classés. Pour chaque événement type, attribué une conséquence ajouté aux résultats estimés dans la section précédente.

#### **Prévision pour le court terme par régression**

Estimation dynamique des matrices OD par la méthode Filtre Kalman (Lefevre et Faouzi, 2000)

#### **Prévision pour le court terme : prise en compte des mesures d'exploitation**

Simulation dynamique pour la prévision des effets de la gestion du trafic.

### **3.6.CONCLUSION DU CHAPITRE**

Dans ce Chapitre 3, nous avons décrites des actions d'exploitation du trafic sur un réseau routier. L'analyse des flux d'information pour l'exploitation du trafic (recueillement, traitement de données et actions d'exploitation) permet de montrer les liaisons étroites entre les mesures de gestion du trafic appliquées et l'information du trafic diffusée aux usagers.

<i>Maintien de la viabilité</i>	<i>Gestion du trafic</i>	<b>Aide au déplacement</b>
Mesures autres que l'information	Mesures autres que l'information	Informations diverses
	Information	Information de sécurité

---

	préventive/indicative	générale
Information d'alerte de proximité	Information d'annonce de mesures	Information événementielle

---

Par ailleurs, en regardant sur le traitement de données de trafic, nous avons pu distinguer les différents caractères temporels de l'information routière, notamment l'information sur les conditions de trafic, historique, en temps réel ou prévue.

Grace au recueillement de données en temps réel, aux méthodes d'estimation dynamique des matrices OD, et à la simulation dynamique, les méthodes de prévision des conditions du trafic d'aujourd'hui sont assez matures pour être capable de fournir de l'information dynamique prévisionnelle sur les conditions du trafic que sont confrontés les usagers lors de leur prochain déplacement.

## **Partie II. Analyses bibliographiques**



Cette partie va consacrer à établir une revue de littérature liée à la modélisation de l'affectation du trafic routier. Nous nous intéressons aux deux aspects principaux : empirique et conceptuel.

Au niveau empirique, nous allons regarder les évidences empiriques en termes de comportements de choix des usagers routiers : les options de choix appréciées par un usager pour un déplacement ? La procédure suivie ? Les critères comptés, etc. comment la procédure de décision change en présence de l'information du trafic ?

Au niveau conceptuel, nous allons réviser les méthodes d'affectation du trafic routière existantes. Nous nous focalisons aux modèles de choix, notamment de choix d'itinéraire en négligeant l'écoulement du trafic. Chapitre 5 ne révisé que les modèles élémentaires sans tenir en compte non plus les algorithmes d'affectation en équilibre ainsi que l'aspect dynamique qui est nécessairement considéré pour une affectation dynamique





## Chapitre 4. Comportements des usagers : évidences empiriques

---

### 4.1. INTRODUCTION

#### 4.1.1. Contexte

Pour effectuer un déplacement, l'utilisateur routier choisit ses options de déplacement. Car le réseau routier est souvent étendu dans l'espace et les conditions de trafic s'évaluent dans le temps, il doit choisir son itinéraire et son horaire de départ. En plus, il peut éventuellement choisir se déplacer ou non, choisir sa destination pour certain motif de déplacement ainsi que son mode de transport (autres que le mode automobile).

A priori, l'utilisateur choisit ses options en fonction de ce qu'il connaît du réseau et des conditions du trafic. Sa connaissance sur le réseau et les conditions du trafic peut se construire lors de ses déplacements répétitifs. En plus, les services d'information routière, qui sont en développement constant, peut aider et guider l'utilisateur dans son choix de déplacement.

Bien qu'une connaissance sur les comportements de choix des usagers soit un point clé pour la modélisation des déplacements, l'observation des comportements des usagers-automobilistes reste toujours une problématique. L'observation des comportements est difficile puisque la procédure de décision des usagers est invisible et variable de l'un à l'autre. En plus, elle est influencée par nombreux facteurs : expérience, information reçue, contexte de déplacement, préférences personnelles qui sont toutefois difficile à observer.

#### 4.1.2. Objectif

Dans ce chapitre, notre objectif n'est pas de présenter une enquête sur les comportements des usagers d'un endroit donné mais de réviser les travaux existants sur afin d'établir une connaissance synthétique sur les comportements de choix des usagers routiers, en particulier les comportements de choix en absence ou en présence de l'information routière.

Dans le cadre de notre travail, nous nous délimitons à traiter le choix d'horaire et celui d'itinéraire en négligeant le choix modal et le choix de destination.

#### 4.1.3. Contenu

Nous présentons notre synthèse bibliographique en 5 sections : une présentation globale (§4.2), une synthèse des concepts (§4.3), le choix et l'interaction réseau –

information - usager l'impact de l'information selon les caractéristiques individuelles (§4.4), l'impact de l'information selon le réseau et l'offre de l'information (§4.5).

## **4.2.CHAMPS D'ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE**

Afin d'assurer la validité des résumés, nous avons choisi les références de manière à bien représenter les travaux existants en termes géographique, chronologique et aussi méthodologique.

Les références empiriques concernent un certain nombre des pays : l'Afrique du Nord, l'Allemagne, la Belgique, les Etats-Unis, la France, l'Italie, le Japon, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, le Taiwan. Et elles portent sur diverses thèmes : étude du comportement de déplacement en général, étude spécifique examinant le comportement des automobilistes sous l'impact d'un système de diffusion de l'information routière, étude sur des types de choix différents, étude sur l'accessibilité d'un système d'information précise, etc.

### **4.2.1.Chronologie des études**

Les études empiriques afin de comprendre le comportement général de déplacement et améliorer la pertinence des modèles du trafic ont démarré dans années 1960 (Wachs, 1967). Dès des années 1980, nous avons déjà un nombre important de contributions véritables aux Etats-Unis, aux Pays Bas, etc. Au début, on a considéré la question de choix d'itinéraire. (Tagliacozzo et Kochen, 1970) (Tagliacozzo et Pirzio, 1973) (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984), (Bovy et Bradley, 1985), (Antonisse, Daly *et al.*, 1989) et ensuite la question de choix d'horaire (Mannering, 1989) quand la congestion est devenue de plus en plus importante.

Concernant le comportement général<sup>1</sup> de déplacement, jusqu'à la fin de la décennie 1980, on a obtenu une base de connaissances suffisamment large et systématique. (Bovy et Stern, 1990) ont synthétisé des connaissances du monde de chercheurs sur ce sujet dans une vaste bibliographie.

Dans le temps plus tard, des années 1990s, 2000s nous trouvons aussi des travaux portant ce type d'étude qui étudient encore le comportement général en France et d'autres pays (Augagneur, Boulet *et al.*, 1992), (Cété-de-Lyon, 1999), (Andan et Faivre d'Acier, 2000) en France ou (Bezuidenhout, 2002) en Afrique du Sud.

Dès l'époque de la congestion, avec le développement des services d'information aux usagers de la route, les questions concernant la diffusion et l'usage de l'information devient émergentes :

---

<sup>1</sup> « Comportement général de déplacement » c'est-à-dire le comportement de déplacement dans la condition d'absence de l'information routière.

- Comportement de choix d'itinéraire des usagers en présence de l'information du trafic: (Emmerink, Nijkamp *et al.*, 1996), (Lotan, 1997), (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997), (Al-Deek, Khattak *et al.*, 1998), (Khattak, Yim *et al.*, 1999), (Chatterjee, Hounsell *et al.*, 2002), (Khattak, Yim *et al.*, 2003), (Levinson, 2003), (Selten, Chmura *et al.*, 2004), (Jou, Lam *et al.*, 2005), (Avineri et Prashker, 2006).
- Comportement des usagers en faisant face aux dynamiques du réseau et à la diffusion de l'information : (Iida, Akiyama *et al.*, 1992), (Adler, McNally *et al.*, 1993), (Lotan, 1997), (Adler, 2001), (Denant-Boèmont et Petiot, 2003), (Avineri et Prashker, 2006) et aussi
- Comportement de conduite des usagers (Luoma, Rama *et al.*, 2000)

#### 4.2.2.Synthèse des approches

En termes de méthode, une étude compte en général deux parties : la collecte des données et le traitement des données. Parmi les références que nous avons consultées, nous distinguons trois méthodes de collecte des données :

- Observation directe : (Cété-de-Lyon, 1999), cette méthode utilise normalement des boucles comptage pour collecteur des données concernant le volume, et la répartition du trafic dans un endroit précis.
- Enquête questionnaire : (Andan et Faivre d'Acier, 2000), (Augagneur, Boulet *et al.*, 1992) (Bezuidenhout, 2002), (Chatterjee, Hounsell *et al.*, 2002), (Emmerink, Nijkamp *et al.*, 1996), (Jou, Lam *et al.*, 2005), (Khattak, Yim *et al.*, 1999), (Khattak, Yim *et al.*, 2003), (Luoma, Rama *et al.*, 2000), (Mannering, 1989), (Tagliacozzo et Pirzio, 1973), (Wachs, 1967), (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997). On distingue deux types d'enquête questionnaire, un par interview direct et l'autre par voie postale. Les enquêtes questionnaires nous permettent de comprendre les attitudes des répondants, et de les mettre en relation avec leurs caractéristiques personnelles, leur contexte de déplacement.
- Etude expérimentale en laboratoire utilisant des appareils simulateur : (Bonsall, 1992), (Adler, McNally *et al.*, 1993), (Adler, 2001), (Avineri et Prashker, 2006), (Denant-Boèmont et Petiot, 2003), (Iida, Akiyama *et al.*, 1992), (Levinson, 2002), (Lotan, 1997), (Selten, Chmura *et al.*, 2004). Certains appareils sont capables d'imiter un environnement virtuel sous un scénario de déplacement donné. D'autres, moins raffinés, proposent un jeu de rôle. Les participants sont choisis par hasard, on effectue des choix dans le jeu comme un celui dans le déplacement réel. En regardant directement les comportements des participants pendant expérimentation, on peut savoir : le comportement de choix des voyageurs dans des situations dynamiques<sup>1</sup> ; l'acquisition de l'information et la capitalisation des

---

<sup>1</sup> « Situation dynamique » signifie la situation où la condition de circulation change dans le temps et dans l'espace, de plus les usagers sont informés plus ou moins sur le changement de la condition de circulation.

connaissances des usages, par exemple : effet « jour à jour »<sup>1</sup> ; et le mécanisme dynamique dans les réseaux, bien sur ils s'agissent des réseaux virtuels.

Le traitement des données procède généralement en deux étapes : l'une d'analyse qualitative qui permet d'identifier des éléments ou des hypothèses, l'autre d'estimation statistique qui permet de tester des hypothèses, de montrer des conclusions quantitatives. Citons ici quelques méthodes utilisées : régression, modèle de Poisson, technique « Grouping », etc.

#### **4.2.3.Méthode de lecture**

Afin de traiter un certain nombre des références concernant des travaux sur le comportement de déplacement des voyageurs, nous retirons tout d'abord des éléments relatifs à notre sujet, en particulier des éléments et après nous synthétisons d'abord un cadre d'interaction entre le réseau, les individus. En suite, analysons l'impact de l'information sur le comportement des automobilistes.

Par une lecture rapide, nous avons une impression que la majorité des travaux contribue à étudier le comportement des usagers face aux systèmes de l'information avancée aux usagers tels que information du trafic diffusée par radio, télévision, téléphone ou PMV, dispositif guidage embarqué. Il y a peu des études qui contribuent à évaluer des impacts des panneaux de signalisation fixes, un dispositif d'information routière conventionnel. Dans notre liste des références, nous n'avons trouvé que celle de (Cété-de-Lyon, 1999).

De plus, les conclusions quantitatives obtenues par des travaux sont moins convergentes mais souvent varié et parfois contradictoires. Donc, dans notre synthèse ci-après, nous ne présentons que les conclusions qualitatives.

#### **4.3.SYNTHESE DES CONCEPTS**

Dans cette section, notre objectif est d'identifier un cadre capable de décrire en général le comportement de choix des automobilistes dans le système de transport. Il s'agit des études empiriques des années 1960s, 1970s et 1980s qui ont été mises au niveau conceptuel par (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984), (Bovy et Stern, 1990).

---

<sup>1</sup> Effet « jour à jour » : le comportement de choix des usagers change selon la capitalisation des expériences et de la familiarité du réseau et du système de l'information.

### 4.3.1. Vue d'ensemble du système routier

#### Complexité d'un système de transport

Un système de transport routier est un objet complexe qui consiste majoritairement en un réseau et en des usagers de la route :

- Un réseau routier est souvent complexe car il est combiné par un grand nombre des arcs et leurs intersections, chaque arc ou intersection porte plusieurs attributs (routes, leurs intersections, revêtement des voie, etc.)
- Chaque usager de la route s'agit-il un objet complexe car il porte ses caractéristiques personnelles, son contexte de déplacement, et des préférences diverses.

L'interaction et les événements routiers font le système plus complexe :

- Les voyageurs sont libres de choisir leur option la plus préférée parmi les options disponibles. Leurs choix vont déterminer la répartition et le chargement du trafic sur le réseau, ce qui va modifier la condition de circulation et les attributs des options de choix.
- De plus, les événements routiers prévus ou imprévus qui se produisent sur le réseau vont influencer plus ou moins la condition de circulation.

Donc, l'attractivité des itinéraires concurrents change en fonction du temps. L'itinéraire optimal courant peut plus n'être optimal pour la période de temps suivante

#### Les facteurs qui influencent le choix individuel

Le comportement de choix de déplacement d'un usager est conditionné par les caractéristiques physiques du réseau, les caractéristiques personnelles du décideur, son contexte de déplacement mais aussi par l'usage de la route des autres voyageurs et des aléas. Dans un effort d'identifier tous les facteurs qui conditionnent le choix d'un usager, (Bovy et Stern, 1990) ont proposé une catégorisation des facteurs qui influencent le choix de voyage tel que :

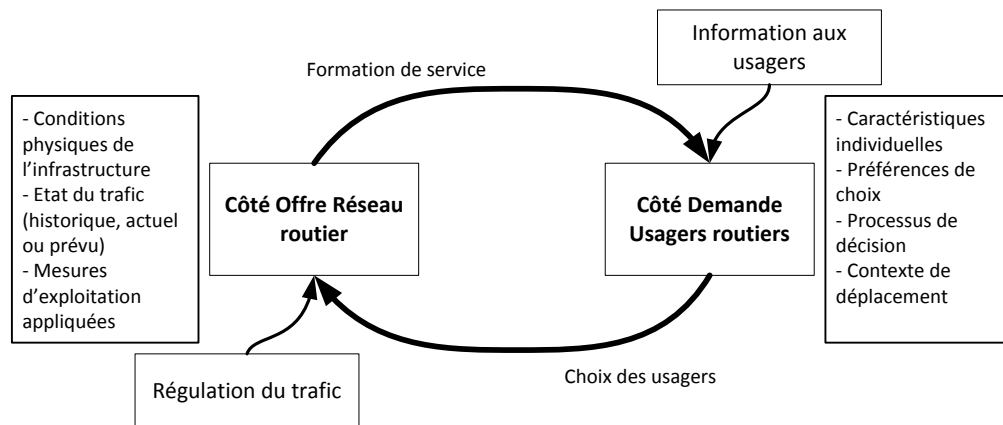
Voyageur		Âge, sexe, cycle de vie, niveau de revenu, éducation, structure de ménage, course, profession, longueur de résidence, nombre de conducteurs dans la famille, nombre de voitures dans la famille, etc.
Itinéraires	Routes	Temps de parcours, coût de voyage, limites de vitesse, temps d'attente. Type de route, largeur, longueur, nombre de voies, intersections, ponts, pentes, etc.
	Trafic	La densité du trafic, la congestion, le nombre de tours, les signes d'arrêt et les feux, la vitesse de voyage, le stationnement, la probabilité de l'accident, la fiabilité et la variabilité du temps de voyage, etc.
	Environnement	Esthétique, utilisation de terre le long d'itinéraire, paysage, facile ramassage /descente, etc.
Voyage		Le but du déplacement, le budget du temps, la période du voyage, le mode utilisé, le nombre de voyages
Circonstances		Condition météorologique, jour/nuit, accident en cours de route, information des routes et de trafic, etc.

**Tab. 4-1 : Les facteurs qui influencent le choix de déplacement**

Dans cette classification, une décision de déplacement est influencée par les caractéristiques personnelles du décideur, puis par les attributs des options de choix, par le contexte du voyage et enfin par les circonstances rencontrées. Nous critiquons cette catégorisation sur deux points :

- Indépendance entre les catégories : le temps de parcours n'est pas une valeur fixe, il est conditionné par la condition du trafic. De plus la condition du trafic est conditionnée par des circonstances ou des événements routiers.
- Aspect dynamique dans la décision de voyage : la condition de circulation varie dans le temps et dans l'espace car les événements routiers (prévus ou imprévus) se produisent sur la route. La connaissance des voyageurs est améliorée progressivement grâce à l'information reçue et à l'expérience de déplacement. Ces phénomènes ne sont pas abordés dans le tableau ci-dessus.

(Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984) et (Antonisse, Daly *et al.*, 1989) ont proposé une autre catégorisation. Les facteurs qui influencent le choix sont divisés en 3 groupes: (1) Connaissance des voyageurs sur les options disponibles, (2) Processus de décision, (3) Attributs des itinéraires ; préférences de choix. Cette catégorisation considère plus ou moins le rôle de l'information et de la connaissance dans le choix. Mais on ne trouve pas le rôle des caractéristiques individuelles dans les catégories.



**Fig. 4-1 : Rapport des sous-systèmes et le rôle de l'information dans le comportement de choix**

Nous n'avons pas l'ambition de synthétiser tous les facteurs qui peuvent influencer le choix individuel comme les travaux de (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984) ou (Bovy et Stern, 1990). Mais nous analyserons le comportement de choix dans un système à travers la place des sous-systèmes et leurs interactions. Donc, nous proposons un cadre qui explique le choix de déplacement d'un individu conditionné par lui-même, par le réseau mais aussi par l'interaction entre les usagers et le réseau.

#### 4.3.2. Le sous-système réseau

On peut citer les caractéristiques d'un réseau routier tels que : distance, intersection, feux de signalisation, coût de péage, type routier, limite de vitesse (issu du code de la route), nombre de voies, ponts, pentes, paysage, utilisation de terre le long de l'itinéraire.

L'ensemble des caractéristiques du réseau, avec les conditions de circulation va formuler des attributs statiques des options de choix. Mais, la perception de la présence des options ainsi que leurs attributs sont en pratique déterminés par l'expérience et l'information disponible pour l'usager.

#### 4.3.3. Le sous-système usager

Pour un usager, nous citons des facteurs qui influencent probablement le choix de déplacement :

- (i) Caractéristiques personnelles d'un voyageur: âge, sexe, niveau de revenu, éducation, structure du ménage, course, profession, longueur de résidence, nombre de conducteurs dans sa famille, nombre de voitures dans sa famille, etc.
- (ii) Contexte de déplacement: but du déplacement, budget-temps disponible ; période du voyage ; fréquence de déplacement ; équipement disponible, etc.

(iii) Processus de décision : (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984), (Antonisse, Daly *et al.*, 1989), (Bovy et Stern, 1990) ont synthétisé trois types de décision :

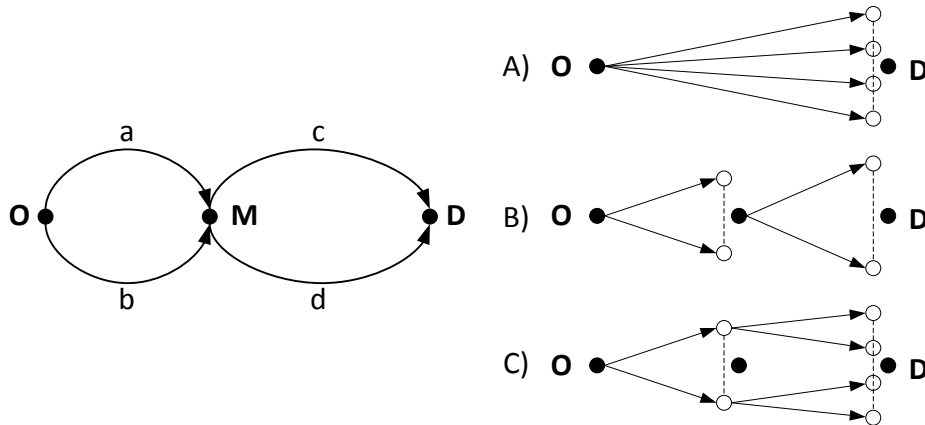


Fig. 4-2 : Trois structures de décision. Source : (Bovy et Stern, 1990)

La Fig. 4-2 illustre les trois structures de décision typiques pour le cas où l'utilisateur prend de décision sur un réseau maillé :

- (A) Pré – planification (Choix simultané): on prend la décision avant le départ et n'en change pas pendant son voyage.
- (B) Processus Markov (choix séquentiel): sur le long du trajet, on ré-choisit parmi les routes disponibles vers sa cible provisoire.
- (C) Processus intermédiaire (choix hiérarchique): le choix est actualisé à chaque nœud et il dépend aussi des choix précédents.

(iv) Préférences de choix : Il est difficile d'indiquer si les préférences sont endogènes ou exogènes. En fait, les préférences de choix sont déterminées majoritairement par des caractéristiques individuelles, mais plusieurs études ont indiqué que d'autres facteurs comme les caractéristiques du réseau, la condition de circulation influencent plus ou moins l'identification de l'ensemble des préférences de choix.

La question de savoir comment un voyageur compare et choisit une option a été largement traitée. (Wachs, 1967) a fourni un des travaux pionniers sur ce sujet. Ensuite, un grand nombre des travaux ont cherché à approfondir la question. Les résultats des études (Tagliacozzo et Pirzio, 1973) (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984), (Antonisse, Daly *et al.*, 1989), (Mannering, 1989), (Bezuidenhout, 2002)) ont montré que le classement des choix varie suivant les caractéristiques personnelles, le contexte de déplacement. Mais le temps de parcours est probablement le critère déterminant (Wachs, 1967), (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984), (Antonisse, Daly *et al.*, 1989), (Bezuidenhout, 2002).



De plus, les voyageurs ne se basent pas sur une préférence unique pour prendre leur décision mais sur un ensemble des critères avec une composition complexe. Dans cette combinaison, la composition et l'importance des préférences dépendent des autres facteurs, tels que : caractéristiques personnelles, caractéristiques du voyage, le réseau, condition du trafic, etc. (Wachs, 1967) , (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984), (Antonisse, Daly *et al.*, 1989), (Mannering, 1989), (Augagneur, Boulet *et al.*, 1992), (Andan et Faivre d'Acier, 2000), (Bezuidenhout, 2002).

#### **4.3.4.Interaction usager – réseau**

Les deux sous-systèmes usager et réseau conditionnent le choix d'un individu. Réciproquement, le choix de déplacement des usagers du système détermine l'état du trafic. Donc l'interaction usager – réseau se traduit en le comportement de choix des individus et également en l'état du trafic.

L'état du trafic ou la condition de circulation sont mesurés par la densité du trafic à chaque route ou par le régime de circulation.

La connaissance d'un usager sur les attributs des options est déterminée par son expérience d'une part et par l'information reçue d'autre part. Donc, la diffusion de l'information routière aux usagers a un double objectif. En plus de faciliter les déplacements, elle constitue aussi un outil pour intervenir sur le comportement de choix individuel des voyageurs, et améliorer le trafic de l'ensemble du réseau.

#### **4.3.5.Interaction réseau – information – usager**

L'interaction réseau – usagers se traduit en le choix individuel des usagers de la route. Dans cette section, nous étudions l'interaction réseau – information – usager en traitant typiquement le comportement de choix des automobilistes sous l'impact de l'information routière. Nous abordons un peu le comportement de conduite en route.

Dans le premier chapitre, on a abordé sept contenus de l'information : réseau, itinéraire exploitant, itinéraire usager, état actuel ou prévisionnel du trafic, information à la conduite. Nous constatons que la production de l'information dynamique, tel que « état prévisionnel du trafic » se base sur l'observation sur l'état actuel et des modèles de prévision du trafic. Donc, le comportement de choix des usagers conditionne l'information routière diffusée

#### **Planification des voyages**

Avant un voyage, on élabore toujours un programme : une heure de départ et un itinéraire spécifiques avec différents niveaux de précision. On estime l'heure de départ à partir du temps de parcours prévu et de l'horaire d'arrivée désiré. Pour ce type de décision, une carte routière ou un moteur de calcul d'itinéraire sont

utiles pour tracer un itinéraire. De plus, l'information concernant les conditions de circulation par radio, télévision ou téléphone est nécessaire pour choisir l'heure de départ. Il faut remarquer qu'on n'a pas trouvé d'études concernant le comportement d'utilisation d'une carte routière, un livret routier, etc.

A priori, on utilise des informations concernant la condition du trafic (prévue ou actuelle) pour choisir de faire le déplacement ou non, si oui quelle est l'heure de départ (les dispositifs correspondant sont le livret routier, la carte électronique sur la condition du trafic). Pour décider quel itinéraire on va prendre, on combine l'information dynamique sur l'état du réseau et information statique sur les caractéristiques physiques du réseau (carte papier, moteur calcul d'itinéraire sur Web ou PDA). Il est probable que certains voyageurs ne précisent pas leur itinéraire avant mais aient envie de suivre la signalisation directionnelle en route. (Tagliacozzo et Pirzio, 1973) ont montré que dans certains cas où le voyageur ne dispose pas de suffisamment de connaissances pour tracer un itinéraire particulier, il suivra les routes principales visibles et la signalisation pour approcher la cible.

Il faut considérer que les livrets routiers publiés en France, tel que celui de Bison Futé (Calendrier Bison Futé) influencent probablement le choix de la date de départ d'un certain nombre des voyages de type loisir. Malheureusement, nous n'avons trouvé aucune étude qui évalue ses effets sur la planification des voyages interurbains.

Les voyageurs changent leur destination de voyage quand ils perçoivent une condition de circulation difficile. Cette hypothèse est probablement valable pour certains types de voyage, par exemple : shopping, tourisme.

### **Décision dans les situations dynamiques**

Est-ce qu'un usager annule ou reporte son voyage s'il perçoit une condition de circulation difficile via des sources d'information diverse ? (Khattak, Yim *et al.*, 1999) a mis en évidence cette question par une enquête questionnaire conduite à San Francisco. On a trouvé que les voyageurs de types de déplacement en dessous de domicile – travail (loisir, shopping, etc.) peuvent décider de reporter leur voyage quand ils perçoivent une condition de circulation défavorable par des sources d'information diverses, en particulier par la radio du trafic. Cette conclusion a été confirmée par (Andan et Faivre d'Acier, 2000). Dans une étude interview conduite en grande agglomération de Lyon, il est indiqué que les voyageurs peuvent annuler ou changer leur horaire de départ si la condition de circulation est difficile (congestion, condition météorologique mauvaise, rupture d'itinéraire).

(Khattak, Yim *et al.*, 1999) a montré que la radio en Californie qui diffuse de l'information sur le trafic fait augmenter la fréquence de changement de la planification de déplacements des usagers. Une enquête à Amsterdam conduite

par (Emmerink, Nijkamp *et al.*, 1996) a indiqué que plus de 70% des usagers de la route sont influencés par l'information routière (ce résultat convient à ce que (Yim, Khattak *et al.*, 2004) a présenté. (Jou, Lam *et al.*, 2005) a confirmé cette conclusion : « la diffusion de l'information sur la condition du trafic fait changer d'itinéraire les voyageurs plus fréquemment et diminue la gravité de la congestion ».

(Mannering, 1989) a effectué une étude questionnaire sur la décision de changement de déplacement sous l'impact de la radio qui diffuse des informations concernant la condition du trafic. Le résultat a indiqué que 45,3% des répondants changent leur itinéraire avec une fréquence moyenne de 2,3 changements par mois.

Nombre de changement d'horaire de départ par usager par mois	2.32
Pourcentage des usagers qui ne changent jamais leur horaire de départ	54.70%
Nombre de changement d'itinéraire par usager par mois	2.81
Pourcentage des usagers qui ne changent jamais leur itinéraire	51.30%

**Tab. 4-2 : Changement d'itinéraire ou/et d'horaire sous l'impact de l'information diffusée via la radio trafic (Mannering, 1989)**

Enquête	BAS1	B1S1	Target1	TATS1	TATS2	ISP
Echantillon	860	852	212	173	158	334
Changement	30%	34%	15%	47%	56%	84%
Pas de changement	70%	66%	85%	53%	44%	16%

**Tab. 4-3 : Taux des usagers influencés par l'information du trafic dans les zones urbaines californiennes. Source Yim et al. 2004**

Enquête	BAS1	B1S1	Target1	TATS1	TATS2	ISP
Horaire	44%	44%	25%	16%	13%	37%
Itinéraire	71%	71%	69%	33%	29%	50%
Mode	10%	10%	13%	1%	11%	1%
Report de voyage	10%	2%	3%	4%	6%	7%

**Tab. 4-4 : Types de changement constatés (suite du Tab. 4-3). Source : (Yim, Khattak *et al.*, 2004)**

Les enquêtes de (Yim, Khattak *et al.*, 2004) effectuées dans des zones urbaines californiennes ont montré des résultats variés. Et on constate un grand nombre des voyageurs qui ne sont pas influencés par l'information diffusée via des supports électroniques.

Concernant le basculement en route quand le voyageur perçoit plus d'information sur la condition de circulation, (Chatterjee, Hounsell *et al.*, 2002), (Emmerink, Nijkamp *et al.*, 1996), (Jou, Lam *et al.*, 2005), (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997) ont souligné que l'information diffusée via la radio ou des PMV sur la route influence le comportement de choix d'itinéraire en route des voyageurs.

En analysant les types de changement, on a trouvé que les voyageurs changent typiquement en premier leur itinéraire, puis leur heure de départ. Il n'y a pas beaucoup d'annulation de voyage

#### **4.3.6. Comportement de conduite**

Au niveau du comportement de conduite, il faut vérifier que l'information sur les panneaux fixes, sur les panneaux variables, sur les radios ou les dispositifs de guidage puisse aider les usagers. La diffusion du temps de parcours ou les conditions de circulation difficiles peut donner aux usagers plus de confort, de sécurité et moins d'incertitude. Les rappels vigilance sur les radios ou PMV amènent sécurité et confort. Au moins 89% des voyageurs ont déclaré que l'information sur la glissance influence le comportement en route du voyageur et les PMV influencent significativement la vitesse des véhicules, l'espacement entre les véhicules et la vigilance des usagers : la vitesse diminue 1 – 2 km/h à la distance 500 – 1000 m après le PMV (Luoma, Rama *et al.*, 2000).

#### **4.4. CARACTERES ET COMPORTEMENTS INDIVIDUELS**

Nous avons analysé précédemment l'impact de l'information routière sur le comportement de choix d'itinéraire, d'horaire et sur le comportement en route des voyageurs. En pratique l'usage de l'information n'est pas identique de l'un à l'autre parmi les automobilistes, il dépend les caractères de chaque usager. Dans cette section, nous aborderons l'usage de l'information routière au niveau individuel : le comportement de l'utilisation de l'information par différents groupes d'usagers, l'accessibilité aux services d'information et en fin l'acquisition de l'information et l'apprentissage.

##### **4.4.1. Caractères individuels**

Un grand nombre des facteurs individuels peuvent influencer l'usage de l'information routière. Nous citons ici quatre facteurs : caractéristiques socio-économiques des usagers, contexte de déplacement des usagers, familiarité avec le réseau et familiarité avec le système d'information routière

### Caractéristiques socio-économiques

Un certain nombre de travaux montrent que les comportements face à l'information dépendent de plusieurs caractéristiques personnelles, caractéristiques qui varient selon les études :

- Age : les jeunes (moins de 45 ans) sont moins influencés par des PMV que les personnes âgées (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997). Les voyageurs âgés ne cherchent pas à changer leur itinéraire habituel (Jou, Lam *et al.*, 2005), (Mannering, 1989). Inversement, les jeunes changent plus fréquemment d'heure de départ que les âgées (Mannering, 1989).
- Sexe : les femmes sont moins influencées par le temps de ralentissement et d'autres informations trafic affichées sur des PMV ou indiquées par des radios sur la route (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997), (Emmerink, Nijkamp *et al.*, 1996) mais sont plus flexibles en terme de changement d'heure de départ (Mannering, 1989). Concernant les informations comportant des rappels de sécurité, (Luoma, Rama *et al.*, 2000) ont trouvé que les femmes sont plus sensibles que les hommes en terme de diminution de la vitesse mais moins sensibles en terme de contrôle d'espacement entre véhicules.
- Revenu : les voyageurs à haut revenu ont tendance à souvent basculer pour trouver le meilleur itinéraire (Jou, Lam *et al.*, 2005).
- Situation familiale : la fréquence de changement est plus basse pour les gens mariés (Mannering, 1989).
- Les indicateurs marital, sexuel, de nombre de membres de la famille, nombre de voitures de la famille, du revenu et de la flexibilité d'horaire de travail influencent de manière différente la flexibilité de choix d'itinéraire et d'horaire d'un individu (Mannering, 1989).

### Contexte de voyages

La réaction des usagers face à l'information perçue dépend aussi du contexte de déplacement :

- Type de déplacement : les voyageurs pendulaires urbains type domicile – travail sont moins influencés par l'information du trafic que les usagers de l'autoroute qui effectuent d'autres types de déplacement (Emmerink, Nijkamp *et al.*, 1996).
- Longueur du trajet : la probabilité de basculement diminue selon la longueur du trajet vers le centre de Londres (Chatterjee, Hounsell *et al.*, 2002).
- Possibilité d'arriver tard : Les voyageurs qui ont possibilité d'arriver tard ont moins tendance à changer d'itinéraire suite à l'information diffusée par les PMV (Emmerink, Nijkamp *et al.*, 1996), par la radio (Mannering, 1989).

- Contrainte de budget temps : les gens ayant une contrainte de budget temps sont moins influencés par l'information du trafic (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997).

### Familiarité du réseau

Les gens ayant une forte fréquence de déplacement vers le centre de Manchester sont plus flexibles en termes de basculement (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997).

Sur le réseau routier de Londres, il existe une différence significative entre les comportements des londoniens et des non londoniens due à la familiarité au réseau (Chatterjee, Hounsell *et al.*, 2002)

Les voyageurs familiers du réseau sont plus indépendants de l'information perçue (Jou, Lam *et al.*, 2005), (Chatterjee, Hounsell *et al.*, 2002), (Cété-de-Lyon, 1999).

### Familiarité du système d'information

(Lotan, 1997), (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997) ont montré que la familiarité avec le système d'information influence significativement le comportement d'usage de l'information. Les personnes ayant une bonne expérience de l'utilisation de l'information routière sont capables de reconnaître la pertinence et la fiabilité d'une information reçue. Les personnes peu expérimentées croient aveuglément à l'information diffusée.

#### 4.4.2. Accès à l'information

Nous discutons de l'accessibilité à l'information routière à travers certains indicateurs :

- Pourcentage des voyageurs ayant accès à l'information, à chaque service d'information.
- Pourcentage des usagers qui perçoivent de l'information et suivent les recommandations parmi des usagers ayant accès à l'information.
- Répartition par types de dispositifs ou par types de décision.

A priori, il est évident que les panneaux de signalisation fixes, les PMV, les radios, les chaînes de France télévision sont accessibles à tout le monde. En fait, seule une partie des usagers peut percevoir de l'information. Parmi les lectures disponibles, nous n'avons trouvé ni étude qui observe la perception des messages sur des panneaux fixes, des PMV, et des radios sur la route, ni la part d'usagers qui payent pour l'information routière.

---

BAS1 (864)	BAS2 (852)	Target1 (212)	TATS1 (173)	TATS1 (158)
------------	------------	---------------	-------------	-------------

---

Information perçue avant le départ					
Radio	54%	30%	56%	-	-
Télévision	23%	22%		-	-
Téléphone	19%	18%	-	69%	53%
Internet	1%	4%	-	-	-
Information perçue en route					
Radio	68%	48%	45%	-	-
Téléphone mobile	1%	2%	-	31%	47%

**Tab. 4-5 : Répartition de l'usage de l'information par dispositif en Californie. Source : (Yim, Khattak *et al.*, 2004)**

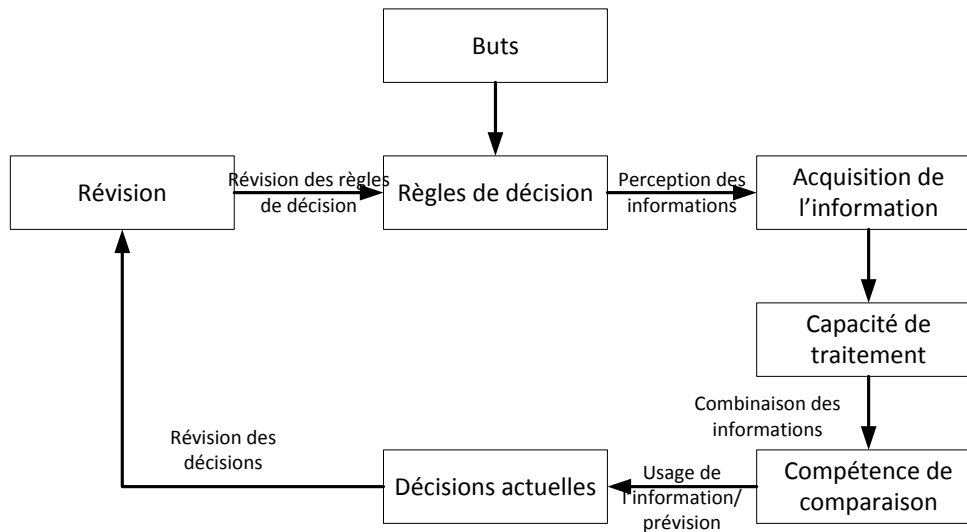
Selon une série des enquêtes au niveau urbain en Californie présentée par (Yim, Khattak *et al.*, 2004), parmi les usagers ayant accès à Internet ou à un téléphone portable, il reste encore un grand nombre des voyageurs (environ 30%) qui n'utilisent pas d'information dans leur décision de déplacement. Après segmentation du marché des services d'information, nous avons constaté que l'information diffusée via la radio est la plus perçue pour la décision avant de départ, puis celle donnée par la télévision, par téléphone et enfin par Internet. Pendant le voyage, la plupart des voyageurs obtiennent de l'information via la radio et une petite proportion par téléphone. Les voyageurs qui n'utilisent pas d'information du trafic expliquent la raison : « n'écoutent pas, infos non fiables, pas d'option, information ne concernant pas leur voyage, incompréhensible ».

En analysant des services d'information payants, nous avons trouvé que les usagers n'acceptent de payer que pour les informations bien personnalisées (Denant-Boémont et Petiot, 2003), (Khattak, Yim *et al.*, 2003). De plus, la disposition à payer dépend significativement de certaines variables, par exemple : revenu, fréquence de déplacement, etc. (Khattak, Yim *et al.*, 2003).

	N=145	N=70	N=57	N=178	N=7
Ne pas écouter	17.9%	15.7%	17.5%	16.7%	14.3%
Non pertinence	44.1%	50.0%	47.4%	41.4%	57.1%
Option unique	24.1%	22.9%	22.8%	22.7%	14.3%
Peu fiable	7.6%	4.3%	5.3%	6.1%	0%
Incompréhensible	0.7%	1.4%	1.8%	0.5%	0%
D'autres réponses	5.5%	5.7%	5.3%	7.1%	14.3%

**Tab. 4-6 : Répartition des usagers qui n'utilisent pas de l'information dans leur décision. Source (Yim, Khattak *et al.*, 2004)**

#### 4.4.3. Acquisition de l'information et apprentissage



**Fig. 4–3 : Aspects dynamiques dans le choix d'itinéraire en présence d'information. Source Ben-Akiva et al. 1991**

Un cadre dynamique de processus de décision a été présenté par (Ben-Akiva, De Palma *et al.*, 1991). Dans ce cadre, le but du processus de décision d'un individu est de chercher à voyager entre une origine et une destination pendant une certaine période avec un coût généralisé minimal (i.e. un coût intégrant le coût monétaire, la distance parcourue, le temps de voyage ou d'autres critères). Il acquiert des connaissances sur la performance du réseau via l'observation directe ou l'information trafic. Puis, il traite et interprète l'information selon ses connaissances actuelles et sa capacité de combiner et à traiter les informations concernant l'état de la circulation. Son interprétation se traduit par une distribution statistique du temps de parcours perçu. L'aspect non déterministe du temps de parcours perçu génère donc un risque de retard. Les perceptions, restrictions et les caractéristiques individuelles forment des préférences pour certaines options (itinéraire, et horaire de départ). Les préférences dépendent également de la connaissance acquise précédemment et mémorisée, et les automobilistes changent leur itinéraire si cela leur permet de réduire le coût généralisé de leur voyage.

Le processus d'acquisition de l'information et de capitalisation des connaissances est traité par plusieurs études expérimentales avec un simulateur en laboratoire (Adler, McNally *et al.*, 1993), (Adler, 2001), (Avineri et Prashker, 2006), (Denant-Boèmont et Petiot, 2003), (Iida, Akiyama *et al.*, 1992), (Levinson, 2002), (Lotan, 1997), (Selten, Chmura *et al.*, 2004).

(Lotan, 1997) a souligné que les voyageurs qui ne connaissent pas bien le réseau veulent toujours essayer plusieurs options afin de collecter suffisamment de connaissances statistiques du réseau. Inversement, les voyageurs qui connaissent bien le réseau modifient leur parcours grâce à l'information dynamique sur les conditions de circulation afin d'optimiser leur voyage. Les



voyageurs se familiarisent avec le réseau après un certain nombre de voyages (4 ou 11 trajets, suivant le critère).

Une étude avec simulateur de (Selten, Chmura *et al.*, 2004) a montré que le nombre de changements d'itinéraire diminue avec le temps et l'augmentation de la connaissance du réseau. Le trafic approche plus vite le point équilibre dans le cas où les voyageurs sont bien informés. L'affectation du « trafic » sur 2 itinéraires a tendance à approcher l'équilibre mais la fluctuation persiste jusqu'à la fin pour les 2 traitements. Quand tous les voyageurs connaissent bien le réseau, l'affectation du trafic correspond aux résultats calculés par des modèles actuels (par exemple : ARIANE) (Cété-de-Lyon, 1999).

Concernant la stratégie de décision, (Iida, Akiyama *et al.*, 1992) a indiqué que le voyageur considère le temps parcours récent, et l'écart entre le temps de parcours prévu et le temps de parcours effectif pour décider un changement d'itinéraire. Dans certains cas, le voyageur considère aussi le comportement d'autres participants à sa décision.

Concernant l'incertitude sur l'heure d'arrivée, (Bezuidenhout, 2002) a signalé un écart de 24 minutes entre l'heure d'arrivée effective au lieu de travail et l'horaire prévu par le planning (à Est London), ceci en vue de se prémunir contre le risque de retard. Cela souligne l'existence d'une forte incertitude sur le temps de parcours. En analysant l'écart entre le temps de parcours prévu et le temps de parcours effectif des individus, on a trouvé que celui du groupe informé est moins fort que celui du groupe non informé. (Iida, Akiyama *et al.*, 1992). L'information dynamique réduit donc bien la variance du temps de parcours. Ainsi, les véhicules privés sont rendus plus fiables et l'incertitude des voyageurs est diminuée.

En comparant plusieurs types d'information, (Adler, 2001) ont trouvé que le gain en temps de parcours augmente suivant le niveau d'accès à l'information et que l'information de guidage est moins utile que l'information du trafic en terme de capitalisation des expériences de déplacement.

Concernant la perception de la valeur de l'information routière par l'utilisateur, (Denant-Boémont et Petiot, 2003) a montré que dans le cas où l'accès à l'information n'est pas gratuit, l'utilisateur compare le coût d'accès avec l'utilité de l'information pour prendre sa décision. Et la propension à payer change selon la capitalisation de la connaissance : au début, le voyageur est plus prêt à payer mais après avoir capitalisé suffisamment de connaissances, il ne veut plus payer.

#### **4.5. RESEAU ROUTIER ET OFFRE DE L'INFORMATION**

Il est évidemment que l'influence de l'information sur le comportement de choix est conditionnée par les caractéristiques des services. Mais on a constaté que les caractéristiques du réseau jouent un rôle plus ou moins important. Un même

type de service qui est efficace sur un réseau mais peut être moins efficace sur un autre.

Dans cette section, nous traitons l'impact des caractéristiques du réseau et de l'offre d'information sur le comportement individuel d'utilisation de l'information.

#### **4.5.1. Réseau routier**

Les caractéristiques des itinéraires jouent un certain rôle dans le comportement des voyageurs face à l'information. (Levinson, 2002) a souligné que l'information du trafic n'influence les usagers que sur les zones congestionnées.

L'étude du tableau 4 montre qu'une grande partie des voyageurs n'utilisent pas l'information du trafic du fait qu'ils ne disposent pas d'itinéraire alternatif.

De plus, l'étude de (Mannering, 1989) a souligné que la longueur du temps de parcours du trajet et la congestion sur la route habituelle ont un impact positif sur le changement d'itinéraire, mais que le temps additionnel sur l'itinéraire alternatif a un impact négatif.

#### **4.5.2. Offre de l'information**

##### **Dispositifs**

Alors qu'un grand nombre d'études évalue l'impact de l'information diffusée par des radios, des télévisions, des PMV, des dispositifs de guidage, etc. sur le comportement individuel et le trafic, peu d'études considèrent l'impact des panneaux de signalisation fixes mise à part celle du (Cété-de-Lyon, 1999). Cette étude a montré que les panneaux fixes ont également une influence sur l'affectation du trafic.

(Emmerink, Nijkamp *et al.*, 1996) a montré que l'information diffusée par des dispositifs divers est utilisée par les usagers de la même façon. Cette conclusion a été confirmée par (Jou, Lam *et al.*, 2005). Inversement, ils ont constaté aussi que les usagers reçoivent l'information routière d'abord via la radio (82%), puis grâce aux PMV (12%). L'information diffusée par les PMV est plus acceptée par les usagers que celle diffusée par d'autres dispositifs

##### **Contenus de l'information**

Le « contenu » est un élément important dans la diffusion de l'information routière. Le message « manifestation » provoque plus de déviations que le message « congestion » ; la probabilité de déviation augmente selon les contenus de messages affichés : « 30 minutes de ralentissement », « ralentissement long » et « aire d'évitement » (Chatterjee, Hounsell *et al.*, 2002).

En étudiant l'effet de 4 types d'information différents : infos qualitatives ; infos quantitatives ; infos qualitatives avec conseils d'itinéraire et infos quantitatives avec conseils d'itinéraire, (Jou, Lam *et al.*, 2005) ont trouvé que l'information quantitative est préférée à l'information qualitative.

Concernant l'affichage du temps de ralentissement, la durée affichée influence fortement la réaction de voyageurs. De plus le message devient plus convaincant lorsqu'il est relié à l'événement source de la perturbation, particulièrement dans le cas d'un accident (Wardman, Bonsall *et al.*, 1997).

### **Modalité d'exploitation**

Bien qu'il n'y ait pas beaucoup de travaux qui étudient l'impact de la modalité d'exploitation sur la sensibilité des usagers face à l'information, nous pouvons citer ici certains facteurs qui influencent peut-être le comportement de déplacement, tels que : la position des dispositifs, densité des dispositifs, dimension, etc.

L'étude de (Chatterjee, Hounsell *et al.*, 2002) à Londres a montré que la modalité d'exploitation du réseau influence plus ou moins le comportement des usagers face à l'information diffusée : la probabilité de basculement diminue avec l'augmentation de la distance entre position du PMV et la position de l'événement apparu.

Les analyses statistiques ont montré que les PMV influencent significativement la vitesse des véhicules, l'espacement entre les véhicules et la vigilance des usagers : la vitesse diminue 1 – 2 km/h à la distance 500 – 1000 m après le PMV (Luoma, Rama *et al.*, 2000).

## **4.6.CONCLUSION DU CHAPITRE**

Dans ce chapitre, nous avons procédé une synthèse des travaux empiriques sur les comportements de choix, notamment le choix d'horaire de départ et d'itinéraire. Nous avons montré que le choix de déplacement s'effectue par une procédure complexe :

- L'utilisateur-automobiliste choisit son déplacement parmi univers des options de choix. Pour chaque option de choix, nombreux attributs sont considérés par l'utilisateur-décideur. Cependant, le temps de parcours est dominant, en particulier pour les déplacements pendulaires.
- La décision de choix de déplacement est conditionnée aussi par le contexte de déplacement de l'utilisateur, ses préférences de déplacement, sa familiarité au réseau, son accès à l'information, etc.
- Le choix de déplacement est également une procédure d'apprentissage. Même si il n'accède pas à l'information, l'utilisateur cherche

toujours à capitaliser et perfectionner ses connaissances sur le réseau et les conditions du trafic.

- Le choix de déplacement de l'utilisateur est fortement influencé par l'information qu'il perçoit. Les usagers informés ont tendance de changer d'itinéraire et d'horaire plus fréquemment que les usagers non-informés.
- L'usage de l'information d'un usager dépend également de nombreux facteurs : la familiarité au système d'information, support de diffusion, contenu de l'information (qualitatif ou quantitative, etc.)

## Chapitre 5. Modèles de choix d'itinéraire et d'affectation du trafic

### 5.1.INTRODUCTION

#### 5.1.1.Contexte

Un réseau de transport typique offre plusieurs options à un usager pour effectuer un déplacement entre une origine et une destination. Chaque option est un itinéraire associé éventuellement un horaire de départ qui se caractérise par nombreux attributs physiques et économiques. Avant d'effectuer un déplacement, l'usager doit prendre une décision de choix afin de trouver l'option qui lui convient le plus. En revanche, les choix de déplacement des usagers déterminent l'état du trafic, donc la concurrence entre les options de choix.

Les points de vue étant adoptés par les modélisateurs pour développer des analyses de transport sont chaque véhicule est opéré par un usager qui dispose un ensemble des options de choix et il est motivé par un raisonnement économique dans sa décision. Un modèle d'affectation doit reproduire économiquement la répartition de la demande sur le réseau qui se compose d'une part de l'infrastructure routière- les lois d'écoulement du trafic et d'autre par la demande de transport – le choix des usagers ainsi que les actions d'exploitation. Dans un tel modèle, on représente le système de transport comme un marché de déplacement : l'infrastructure et l'ensemble des mesures d'exploitation sont représentée comme l'offre, les besoins de déplacement entre les points sont représentés comme la demande de déplacement. Le choix des automobilistes est la rencontre offre-demande. Le modèle d'affectation du trafic porte deux natures physique et économique. Par la nature physique, les études de l'écoulement du trafic essaient de répondre comment une quantité de véhicules présents affecte les conditions de circulation sur une section de route. Par la nature économique, les modèles de choix essaient de reproduire comment les usagers choisir leur options de déplacement en considérant les conditions du trafic et d'autres attributs (Fig. 5–1).

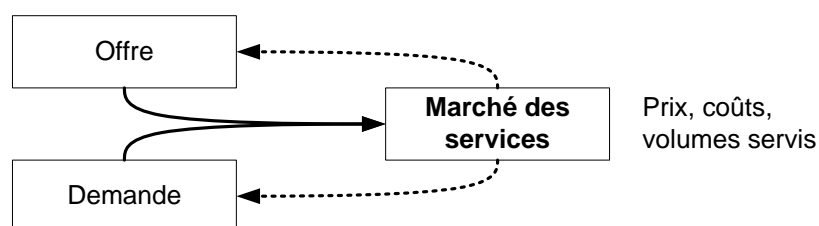


Fig. 5–1 : Interaction offre – demande dans un marché des services de transport. Source : (Leurent, 2004)

### 5.1.2.Objectif

Notre objectif pour ce chapitre est d'établir une revue de littérature sur les modèles d'affectation existant, y compris les modèles permettant d'analyser les effets de l'information du trafic aux usagers. Nous nous focalisons sur l'aspect économique des modèles en ne pas beaucoup abordant de l'aspect physique de l'écoulement ou l'aspect algorithmique.

En plus, nous choisissons de nous intéresser particulièrement au problème de choix d'itinéraire et de négliger le problème de choix d'horaire de départ.

### 5.1.3.Contenu

Nous commencerons à présenter les connaissances psychologiques au sujet de choix d'itinéraire (§2). En suite, nous présenterons les modèles typiques existants (§3). En fin, nous discutons approfondissement sur certains points particuliers liés à la modélisation de la perception et de la décision (§4).

## 5.2. RAPPEL DE MODELES COMPORTEMENTAUX

Les hypothèses comportementales utilisées pour la modélisation d'affectation du trafic sont établies à travers de nombreux travaux empiriques (présenté au 0), synthétisées essentiellement par (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984), (Payne, Bettman *et al.*, 1993) et (Bovy et Stern, 1990), notamment sur les aspects suivants :

- Processus de décision : stratégie de choix, structure de décision, préférences et critères personnels
- Perception des options de choix relié à l'acquisition de l'information et la capitalisation de connaissance.

### 5.2.1.Processus de décision

#### Rationalité

Concernant la stratégie de décision, les psychologues ont constaté des différents comportements des voyageurs :

- Le comportement rationnel : le voyageur compare les coûts des options de manière déterministe ou stochastique et il choisira l'option avec le coût minimum. Ce genre de comportement est souvent utilisé dans les modèles conventionnels.
- La préférence pour certain niveau de risque : le voyageur fixe quelques critères et choisira l'option qui porte le moindre risque (soit par attrait du risque, soit par aversion).

- La stratégie optimale : le voyageur de transport collectif qui ne connaît pas la disponibilité des services donc il prendra le premier service qui devient disponible.

### Structures de décision

On distingue certaines catégories de décision : certains automobilistes décident définitivement leur choix avant de réaliser son déplacement, d'autres prennent des décisions éventuelles selon la condition du trafic rencontrée sur la route. (Bovy et Stern, 1990) ont synthétisé trois types de comportement :

- Processus simultané : l'enchaînement des routes suivies est déterminé une fois pour toutes avant la réalisation du déplacement.
- Processus séquentiel : à chaque intersection, l'automobiliste choisit la prochaine route indépendamment du parcours antérieur.
- Processus hiérarchique : à chaque intersection, l'automobiliste choisit la prochaine route en fonction du parcours antérieur.

Tous les trois sont possibles dans les cas différents. La structure de choix d'un individu dépend de du contexte de déplacement, ses caractéristiques et aussi de la disponibilité des dispositifs d'information. La diffusion de l'information dynamique sur le réseau routière engendre une tendance de prendre plus des décisions en route. Réciproquement, le conducteur ne suit que le chemin indiqué avant le départ car il dispose un calculateur d'itinéraire utilisant une base de données statique.

### Considération des options

Chaque option de choix est caractérisée par nombreux attributs. Est-ce que le voyage considère – t – il simultanément tous les options avec leurs attributs ? Concernant cette question, on a proposé deux modèles :

- Modèle compensatoire : le voyeur traite à la fois l'ensemble des attributs de chaque option de manière compensatoire : la valeur faible d'un attribut peut être suppléée par une valeur élevée d'un autre attribut. On retrouve ce genre de modèle dans la plupart des modèles conventionnels par la formulation des coûts généralisés.
- Certaines études ont montré que le traitement de l'ensemble des options avec leurs attributs exige un trop grand effort cognitif ce que ne dispose pas à un voyageurs avec des contraintes du temps (Payne, Bettman *et al.*, 1993). Donc, le voyageur considère ses option de choix de manière hiérarchique où certains attributs les plus importants sont traités d'abord et d'autres pour la suite, par exemple, la méthode « élimination par aspects » proposée par (Tversky, 1972)

Au sujet de la perception des attributs d'une option, il existe également des différentes hypothèses :

- La perception instantanée : le voyageur perçoit les coûts des options instantanément qui correspond aux conditions du trafic actuelles et indépendamment à ce qui s'est passé antérieurement.
- La perception capitalisée : la perception des coût des options pour une situation de décision récente est une estimation adaptive correspondant à ce qu'il a effectué dans le passé (Horowitz, 1984; Iida, Akiyama *et al.*, 1992).

### 5.2.2. Perception des options de choix

(Bovy et Stern, 1990) ont proposé un schéma « séries hiérarchiques des ensemble de choix pour une situation de choix donnée.

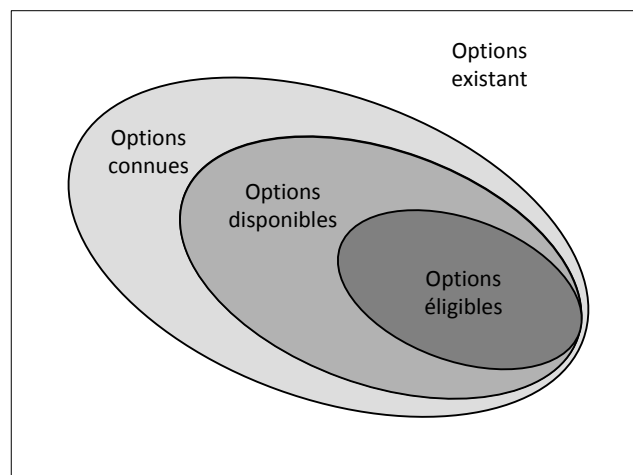


Fig. 5-2 : Illustration de la perception des options de choix par usager

- Ensemble existant : il comprend toutes les opportunités objectivement possibles sur un réseau donné pour un déplacement précis. En fait, par nature, cet ensemble couvre tous les ensembles présentés ultérieurement.
- Ensemble connu : un sous-ensemble de l'ensemble existant qui se compose de toutes les options connues par le voyageur.
- Ensemble disponible : il s'agit encore un sous-ensemble de l'ensemble connu après l'élimination des options significativement ne pouvant pas satisfaire le besoin du déplacement et les contraintes individuelles.
- Ensemble éligible : un sous-ensemble de l'ensemble disponible qui concerne les options concurrentielles ce que le voyageur doit faire de l'arbitrage parmi eux.

L'identification d'un ensemble de choix se fait sous certaines contraintes : les contraintes du système de transport (contrôle d'accès, limite de vitesse, péage,



exhibition à certaines catégories); les contraintes individuelles (certaines préfèrent des voies rapides et autoroutes, d'autres préfèrent des itinéraires avec agrément touristique) et en particulier la connaissance du décideur.

### 5.2.3. Préférences personnelles

Les facteurs qui influencent le choix d'un voyageur ont été étudiés par nombreux chercheurs. Selon certains travaux typiques (Wachs, 1967) ;(Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984; Bovy et Stern, 1990) les éléments les plus importants sont : temps de parcours, distance, nombre des intersection, qualité de chaussées, sécurité, beaux paysages, attractivité touristiques signalisation, etc.

De plus, la considération des facteurs dépend du contexte de déplacement et aussi des caractéristiques personnelles. Par exemple, un chemin avec beaux paysages mais long n'est pas attractif pour le motif obligé (travail, mission) mais oui pour le motif de visite, touristique.

En fin, certains facteurs dominent les autres. Par exemple, le souci de sécurité est mesuré par la durée sur la route (temps de parcours), le niveau de beaux paysages est mesuré par la longueur, etc. Et les modélisateurs sont d'accord que le temps de parcours et la distance sont les plus importants.

## 5.3. MODELES DETERMINISTES

Le choix d'itinéraire a été modélisé originellement des années 1950s par les méthodes de plus courts chemins selon un certains critères de coût : péage, temps de parcours, distance, etc. par la formulation du coût généralisé. Le premier modèle affecte tous le trafic sur un seul itinéraire le moindre coût sans considérer l'interaction offre – demande. En suite, (Wardrop, 1952) a annoncé les deux principes de répartition du trafic qui permet de modélisation la relation débit – temps (et aussi la congestion) et de trouver un état d'équilibre du système.

### 5.3.1. Notion de coût généralisé

Au premier temps, les modèles ne considèrent que le temps de parcours et la distance. Les deux attributs sont considérés simultanément en formulant la fonction de coût généralisé pour l'ensemble de la population de choix. Après, le coût généralisé prend en compte également les caractéristiques individuelles.

Au niveau microscopique, un voyageur – acteur – décideur est noté  $n$  et appelé individu avec ses caractères  $Y_n$ . Un chemin reliant l'origine et la destination est indicé  $m$  et appelé une option. Cette option est caractérisée par un nombre des variables  $X_m$ , appelés les attributs. L'ensemble de toutes les options de choix est appelé l'univers de choix ou l'ensemble de choix et noté  $M$ .

Les attributs de chaque option, tels que temps de parcours, la distance, le niveau d'agrément, le niveau de danger relié au risque d'accident sont traités simultanément par la formulation du « coût généralisé » qui est capable de monétiser tous les attributs. Le coût généralisé de l'option  $m$ , attributs  $(X_m^k)$  considérée par le voyageur – décideur avec ses caractères  $(\beta_m^k)$  est une fonction :

$$G_m = - \sum_k \beta_m^k \cdot X_m^k \quad (\text{eq. 5-1})$$

Cette approche correspond au modèle psychologique « compensation » présenté dans §5.2

Le coût généralisé dans les modèles conventionnels est typiquement linéaire (comme décrit dans eq. 5-1) en supposant une relation de dépendance linéaire. Cependant, cette hypothèse n'est pas évidente, par exemple : le gain de temps de 5 minutes donne des effets différents au comportement des décideurs de trajets totaux de 20 ou 60 minutes ; la perception d'inconfort de 60 minutes de congestion est plus 10 fois élevée que 10 minutes, etc. Donc, dans certains cas, il est nécessaire de former des coûts généralisés de manière non-linéaire. Dans cette partie, nous présentons deux types non-linéarités :

### Les non linéarités élastiques

Ce type de non-linéarité est appelé « élastique » car l'élasticité à la variation d'une variable varie selon la valeur qu'elle prend. Dans la fonction de coût généralisé, la transformation non-linéarité d'une variable  $X$  consiste à remplacer  $X$  par une fonction  $Z(X)$  qui n'est pas linéaire. Les deux transformations les plus connues sont la transformation Box-Cox et Box-Tukey (Box et Cox, 1964) :

$$\text{Box-Cox} : Z(X) = \frac{X^\lambda - 1}{\lambda} \quad (\text{eq. 5-2})$$

$$\text{Box-Tukey} : Z(X) = \frac{(X - \alpha)^\lambda - 1}{\lambda} \quad (\text{eq. 5-3})$$

$\alpha$  et  $\lambda$  sont deux paramètres à estimer.

### Les non linéarités abruptes

La deuxième catégorie introduit des transformations plus brusques de variables avec des discontinuités ou des ruptures de pente. Dans une présentation simplifiée au maximum on segmente la variable en plusieurs intervalles de variations et on applique un coefficient différent pour chacun entre eux ; chaque modèle dans son segment reste linéaire en fonction des coefficients et de la

variable mais la fonction d'utilité n'est plus linéaire (Tobin, 1958). Il existe deux types de modèle Tobit :

**Type 1** : Supposant que l'individu, quand une variable n'atteint pas un certain seuil  $k$ , n'est plus capable de différencier parmi les valeurs de la variable qui sont inférieures au seuil et qu'il les considère comme équivalentes :

$$z(x) = \begin{cases} x \dots si \dots x > k \\ k \dots sinon \end{cases} \quad (eq. 5-4)$$

**Type 2** : Supposant que l'individu, avant de décider d'acheter une quantité  $x$  d'un produit, doit décider d'acheter ou non (Amemiya, 1985) :

$$z(x|y) = \begin{cases} x \dots si \dots y > 0 \\ 0 \dots sinon \end{cases} \quad (eq. 5-5)$$

### 5.3.2.Représentation de la congestion et équilibre de l'usager

Le premier modèle affecte tout le trafic sur un seul itinéraire le plus court même s'il existe d'autres itinéraires avec des coûts égaux sans considérer l'interaction offre – demande, par exemple la relation débit – vitesse. En fait, la qualité de services de transport est en fonction du trafic chargé, la qualité baisse quand le trafic augmente en particulier le temps de parcours et le confort.

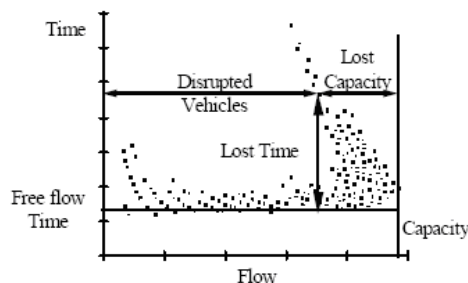


Fig. 5-3 : La relation temps - débit observée

La Fig. 5-3 ci-dessus présente une observation sur la relation débit – temps de parcours. Donc, le temps de parcours est en fonction positive du débit chargé, dans le cas de congestion, le temps de parcours augmente fortement. Les ingénieurs du trafic ont proposé certains modèles pour calculer le temps de parcours dans les conditions de circulation congestionnée, par exemple (Leurent, 2001). Le temps de parcours  $T_{au}$  de la classe  $u$  sur un arc  $a$  :

$$T_{au} = t_{au0} F_{au} \left( \frac{x_a}{K_a} \right) \quad (\text{eq. 5-6})$$

, où :  $t_{au0}$  est temps libre ;  $F_{a,VL}(\xi) = 1 + 0.4\xi^{4ou6}$  ;  $F_{a,PL}(\xi) = 1 + 0.1\xi$

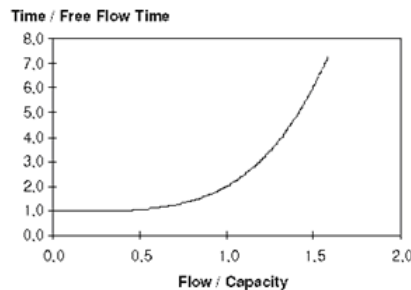


Fig. 5-4 : Un modèle temps – taux de chargement

(Wardrop, 1952) a proposé les deux principes de répartition du trafic qui sont encore utilisés largement aujourd'hui. Concernant un état d'équilibre de l'utilisateur, il a suggéré : « *Le coût de chaque option effectivement utilisée est égal et inférieur à celui que ressentirait un conducteur isolé qui emprunterait une option inutilisée* ».

Le premier principe (Wardrop, 1952) avec un modèle de temps de parcours dans la condition de circulation congestionnée, un tel modèle d'équilibre de l'utilisateur représente un système de transport où les voyageurs peuvent basculer entre les itinéraires afin de minimiser leur coût de déplacement, et le chargement du trafic conditionne le coût des itinéraires.

Cette approche est consolidée par les algorithmes de « plus court chemin » type Dijkstra (Dijkstra, 1959) ou Ford (Ford et Fulkerson, 1962) et la méthode de combinaison convexe qui facilitent les applications sur un grand réseau.

### 5.3.3. Optimum du système

En même temps, (Wardrop, 1952) a annoncé également le deuxième principe « *le coût moyen ressenti par tous les usagers (entre une origine et une destination) est minimum* ». Ce principe n'est plus descriptif comme dans le cas du premier qui tente de décrire une certaine répartition observée dans la réalité mais bien normatif car il définit un état du trafic qui serait souhaitable pour le système, pour la collectivité et que peut chercher à approcher le gestionnaire du réseau. Il décrit la situation où le coût total du système est minimisé dont la fonction globale du coût socio-économique comprend non seulement le coût de circulation individuel mais aussi le coût marginal, les externalités, etc.

Un exemple est la considération du temps de parcours social :

$$t^*(x) = t(x) + x \frac{dt(x)}{dx} \quad (\text{eq. 5-7})$$

Dont le premier composant signifie le temps de parcours individuel, le deuxième signifie l'externalité négative aux autres voyageurs.

## 5.4.SEGMENTATION DE LA DEMANDE

La distinction de la demande: d'abord par paire origine-destination, en suite par caractéristiques comportementales par exemple la vitesse de circulation

Comme avoir présenté dans la section §5.2, les comportements de choix sont variés parmi les voyageurs selon leurs caractéristiques personnels et les conditions de déplacement. Pour bien étudier le choix, quand on construit un tel modèle de choix d'itinéraire, il faut penser à bien appréhender les différences entre les individus, faire de la segmentation afin d'obtenir les groupes de voyageurs plus homogènes.

On distinguera une classe de la demande avec sa matrice origine-destination, pour chaque condition. Dans la représentation de l'offre, on décrira pour chaque moyen de transport à quelles classes il est accessible et pour chacune de ces classes à quelle condition. Nous pouvons distinguer plusieurs types de segmentation.

### 5.4.1.Segmentation multi – classe

La segmentation multi – classe distingue les classes d'usagers selon les conditions d'accès et d'usage :

- Concernant les conditions d'accès aux services, certaines classes d'usagers ont une accessibilité limitée par rapport les autres. Par exemple : sur un réseau routier les PL ne peuvent circuler que sur certaines routes, donc les PL et les VL n'ont pas le même l'ensemble des options de choix ; les handicapés ne peuvent accéder qu'à certaines stations bien équipées, donc les usagers normaux et handicapés n'ont pas le même ensemble de choix.
- Concernant les conditions d'usage, on distingue les comportements différents entre les usagers, par exemple : la vitesse de marche à pieds est très varié entre les piétons : 1 km/h, 3 km/h ou 5 km/h, donc une modélisation de la concurrence entre deux mode : bus – piéton doit distinguer les trois classes de piétons dont une segmentation<sup>1</sup> ; parmi les VL,

---

<sup>1</sup> Un autre exemple de la distinction des conditions d'usage : les temps de transfert ne sont pas identiques par les catégories différentes : les jeunes en pleine forme ont une vitesse probablement deux fois plus vite que les personnes âgées.

la consommation énergétique et l'émission de gaz sont différentes entre les types de moteurs, ce qu'on doit distinguer.

De plus, jusqu'à maintenant, nous connaissons peu les comportements d'usage des services d'information qui influencent fortement le choix des usagers, les conditions d'accès et d'usage des services d'information peuvent faire l'objet d'une segmentation.

### Exemple du modèle captif

Un exemple de ce genre de modèles est le « modèle captif », à cause des conditions d'accès et d'usage, chaque option  $m$  a une certaine part de captifs  $\eta_m$  et d'une proportion totale de captifs de toutes les options  $\bar{\eta} = \sum_{i \in M} \eta_i$ . Donc, ces effets de captivité se modélisent au moyen du modèle Dogit (Gaundry et Dagenais, 1979) :

$$\pi_m = \eta_m + (1 - \bar{\eta}) \frac{\exp(\theta_m V_m)}{\sum_{i \in M} \exp(\theta_i V_i)} \quad (\text{eq. 5-8})$$

### 5.4.2.Segmentation multicritère

La segmentation multi – critère distingue les évaluations de chaque service, et les comparaisons des services dont des arbitrages entre les caractères des services. En mêmes conditions d'accès et d'usage, les individus se distinguent selon l'importance relative que chacun accorde à tel ou tel critère de qualité de service. Par exemple :

- Les arbitrages prix – temps des pauvres et des riches sont différents, et
- Les pénibilités des âgés et des jeunes ne sont pas identiques.

La solution naturelle de modélisation est de segmenter a priori les individus selon la valeur prise par un coefficient. Quand le coefficient est difficile à observer au niveau de l'individu, on peut traiter collectivement un grand nombre de valeurs. On spécifie la diversité des arbitrages entre les critères qualitatifs et le prix par une distribution statistique. Un exemple connu de ce genre de segmentation est les modèles prix – temps.

### Exemple du Modèle prix – temps à coût généralisé

(Leurent, 1996) a donné un modèle bi-critère Prix – Temps. Chaque option est caractérisée en prix et temps  $X_m = (P_m, T_m)$ . Chaque usager a un arbitrage prix – temps  $\alpha$ . La distribution des arbitrage  $\alpha$  répartissent dans la population des usagers avec une fonction de répartition cumulée  $A(\alpha)$ , un décideur de  $\alpha$

perçoit le coût généralisé pour l'option  $m$  :  $G_m(\alpha) = P_m + \alpha T_m$  et chaque option reçoit les usagers qui la préfèrent (avec le coût minimal).

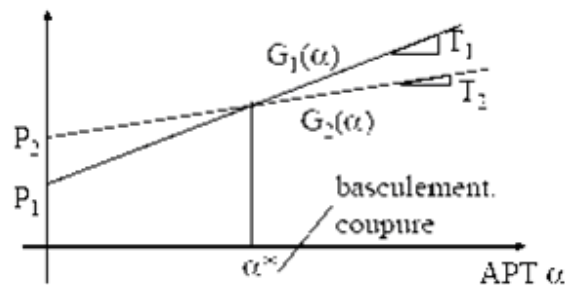


Fig. 5-5 : Les parts de marché pour les deux options selon les arbitrages

La figure ci-dessus illustre une situation de choix entre deux options :

- $\alpha^* \leq \alpha$ , l'option 1 est meilleur pour  $\alpha$
- $\alpha^* > \alpha$ , l'option 2 est meilleur pour  $\alpha$

Si l'option  $m$  est optimale pour  $]x, y]$ , sa proportion d'usage :  $\pi_m = A(y) - A(x)$

#### 5.4.3.Segmentation temporelle

Nous constatons que la demande de déplacement change dans le temps. À côté de la variation de la demande, l'offre des services de transport est souvent modifiée pour s'adapter à la demande. Pour bien étudier les variations temporelles de l'offre et de la demande, on segmente la journée en plusieurs période – types : heure de Pointe du matin, heure de pointe du soir, heure creuse et on raffine la représentation de l'offre (les plans de feux, les plans des services TC) ou de la demande (en volume, en structure de comportement, etc.). Une telle segmentation temporelle peut être traitée de manière statique ou de manière dynamique avec un modèle traitant une succession de période type ce qui en préalable pour étudier notamment le choix d'horaire de départ.

#### 5.4.4.Segmentation combinée

Les types de segmentation présentés précédemment peuvent être combinés dans une modélisation. Tels que les modèles proposés par (Maher et Hughes, 1995), (Morikawa, Miwa *et al.*, 2005); (Avineri et Prashker, 2006) dont chaque classe caractérisée par les condition d'accès et d'usage de l'information a des préférences et des stratégies de décision différentes.

### 5.5.MODELES STOCHASTIQUES

Les modèles déterministes ne sont pas réalistes car ils s'appuient sur un cadre d'hypothèses que les voyageurs ont une connaissance parfaite, les attributs sont

déterministes, et les décideurs considèrent à la fois tous les options avec les attributs et ne choisissent que le moindre coût. Les modèles stochastiques permettent de représenter la répartition du trafic entre les options de choix de manière plus modérée.

Le fondement des modèles stochastiques a été développé depuis le début des années 1970s par deux publications bien connues de (Dial, 1971), (Beilner et Jacobs, 1972). En fait, les premières idées de cette approche ont été annoncées plutôt par (Moskowitz, 1956) (la répartition du trafic sur plusieurs itinéraires par les courbes graphiques californiennes), (Abraham et Coquand, 1961) (le coût généralisé aléatoire avec une distribution aléatoire type gaussien ou uniforme, affectation probabiliste) et (Burrell, 1968). L'idée essentielle de l'affectation probabiliste est de reconnaître que les voyageurs ne prennent pas nécessairement le chemin le plus court mais peut-être un chemin plus long et une option des options reçoivent une certaine probabilité de choix selon ses attributs.

L'idée originelle d'une affectation proportionnelle est issue des méthodes empiriques américaines, méthode californienne pour répartir le trafic entre deux itinéraires concurrents : les courbes graphiques proposées par des ingénieurs Californiens, de Détroit et de l'ASSHO. A travers leurs études empiriques, des ingénieurs californiens ont constaté que :

- Le temps de parcours est le plus important parmi les nombreux facteurs qui influencent le choix d'itinéraire;
- Pour deux options de choix, plus il y a de temps gagné, plus il y a d'utilisateurs ;
- Plus la distance est raccourcie, plus il y a d'utilisateurs.

Donc on peut construire un réseau des courbes systématiques et régulier pour effectuer des prévisions de trafic. S'appuyant sur le même principe mais les ingénieurs de Détroit pensaient qu'il faut calculer le temps et la distance à partir les points de choix. Cependant, la méthode utilisée dans l'AASHO a utilisé les rapports des temps de parcours et des distances.

(Abraham et Coquand, 1961) a développé cette idée en proposant en première fois le terme coût généralisé aléatoire qui représente les erreurs dans la perception du coût des voyageurs. Il a suggéré des distributions aléatoires type gaussien ou uniforme pour représenter la partie aléatoires. Il a traité également la corrélation entre les options de choix et calculé la répartition entre deux ou trois options. En fait, l'utilisation des distributions gaussienne ou uniforme pour représenter le coût généralisé rend certaine difficulté dans le réglage des formules de répartition. Malgré des contributions importantes dans ce document, il n'est pas largement connu dans le monde des modélisateurs à cette époque.



(Dial, 1971) a annoncé des principes de répartition entre les options et suggéré d'utiliser une fonction exponentielle pour la répartition du trafic. En même temps, dans un autre travail indépendant, (Beilner et Jacobs, 1972) ont interprété l'erreur dans la perception du coût d'une option par la notion coût généralisé aléatoire.

Suite après, (Florian et Fox, 1976), (Fonlupt, 1977) ont consolidé l'affectation stochastique en supposant l'indépendance entre itinéraires et annonçant le modèle Multinomial Logit. Ce modèle est bien répandu car il est simple à effectuer des applications. Récemment, un grand nombre des versions modifiées apportant plusieurs raffinements sont développées ce que nous présenterons dans la section suivante.

D'autre côté, le modèle Probit a été développé par (Burrell, 1968; Fonlupt, 1977) et (Daganzo et Sheffi, 1977) qui ne supposent pas l'indépendance entre itinéraires mais il attribue une variable aléatoire à distribution Normal.

### 5.5.1. Interprétation économique

#### Principes de répartition

Les principes de la affectation sur multi-chemins ont été développés progressivement depuis des années 1950s et annoncé par (Dial, 1971) comme suivant

Le modèle devrait donner tous les itinéraires raisonnables entre une Origine et une Destination données une probabilité inférieure à 1. Cependant, les itinéraires irraisonnables devraient recevoir une probabilité à 0.

Tous les itinéraires raisonnables des coûts égaux devraient avoir une probabilité égale.

S'il y a plusieurs itinéraires raisonnables qui ont des coûts inégaux, celui moins coûteux à une probabilité plus élevée.

#### Utilité aléatoire

Le coût généralisé  $G_m$  est une désutilité. Donc on peut le transformer en une utilité déterministe notée  $V_m$  :

$$V_m = -G_m = -\sum_k \beta_m^k \cdot X_m^k \quad (\text{eq. 5-9})$$

On reconnaît que les utilités perçues par les décideurs, même sur une option, sont variées car les attributs varient et les décideurs les perçoivent avec erreurs. Donc, l'utilité considérée par les décideurs est une variable aléatoire, appelé

l'utilité aléatoire, noté  $U_m$ , qui est une variable aléatoire composé de l'utilité déterministe  $V_m$  et d'une perturbation aléatoire notée  $\varepsilon_m$ , qui représente tout ce que le modélisateur n'est pas capable de définir explicitement :

$$U_m = V_m + \varepsilon_m \quad (\text{eq. 5-10})$$

### Rationalité

Dans chaque situation d'aléas  $\omega$ , l'individu choisit l'option d'utilité aléatoire maximale réalisée pour  $\omega$ . Alors l'option  $i$  est choisie dans une certaine proportion de cas d'aléa, notée  $\pi_i$  qui est la probabilité que  $U_m$  soit plus grande que les utilités des autres modes  $j$  d'après la distribution des perturbations  $\varepsilon_i(\omega)$  selon les aléas :

$$\pi_i = \Pr(\omega : U_i(\omega) > U_j(\omega) \forall j \in M - i) \quad (\text{eq. 5-11})$$

### 5.5.2. Modèle Multinomial Logit

Afin de former un cadre d'hypothèses plus favorables au calcul des formules précédentes. (Beilner et Jacobs, 1972), (Florian et Fox, 1976) ont proposé que les variables  $\varepsilon_m$  des options doivent être indépendantes identiquement distribuées selon une loi de Gumbel de variance  $\sigma^2$  (i.i.d Gumbel). Par nature, cette distribution se caractérise aussi par le paramètre  $\theta = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma}$  qui permet d'exprimer très simplement la formule de la part de chaque option :

$$\pi_m = \frac{\exp(\theta V_m)}{\sum_{i \in M} \exp(\theta V_i)} \quad (\text{eq. 5-12})$$

Grâce à sa capacité de calcul, le modèle Multinomial Logit est répandu largement aujourd'hui. En effet l'hypothèse d'indépendance et d'identité pour les utilités aléatoires des options semble peu réaliste car les chemins partagent éventuellement certains tronçons de la route. En l'utilisant, nous constatons l'apparition d'un grand nombre des versions modifiées qui seront présenté dans la section suivante.

### 5.5.3. Modèle Multinomial Probit

Dans une autre cadre d'hypothèse, on suppose que les variables  $\varepsilon_m$  suivent une distribution normale multi variée et le modèle est appelé « Multinomial Probit ». Dans ce modèle l'utilité aléatoire de chaque arc a du réseau est modélisé par une variable aléatoire locale :

$$u_a = v_a + \xi_a \quad (\text{eq. 5-13})$$

, où :  $v_a$  est la partie fixe ;  $\xi_a$  une variable aléatoire distribué de façon indépendante selon une loi normale de moyenne nulle.

L'utilité aléatoire de chaque option  $m$  est calculée en sommant les coûts de tous les arcs appartenant à cette option :

$$\begin{aligned} U_m &= \sum_{a \in m} u_a \\ &= \sum_{a \in m} v_a + \sum_{a \in m} \xi_a \end{aligned} \quad (\text{eq. 5-14})$$

On se trouve la décomposition de l'utilité aléatoire dans le modèle Logit avec  $V_m = \sum_{a \in m} v_a$  et  $\varepsilon_m = \sum_{a \in m} \xi_a$

Pour deux options  $m$  et  $n$ , les deux variables aléatoires  $\varepsilon_m$  et  $\varepsilon_n$  ne sont pas indépendantes si elles ont en commun un ou plusieurs arcs. En général, la matrice de covariance entre ces variables dépend de la définition des ensembles de choix et aussi la variance associée à chaque arc.

Le modèle Multinomial Probit prend en compte les corrélations en permettant la covariance entre les perturbations des options. Cependant, en dépit de son appel théorique, les problèmes de la faisabilité ont limité son application. En l'absence d'une solution formelle, le model Multinomial Logit a été typiquement estimé en utilisant la simulation de Monte Carlo, avec la méthode de moyennes successives ((Daganzo et Sheffi, 1977) ; (Sheffi et Powell, 1982) ; (Sheffi, 1985)). En suite, (Maher, 1992) a proposé une approche de calcul qui ne demande pas de simulation numérique en combinant successivement les termes aléatoires par méthode Clark.

#### 5.5.4.Modèle d'équilibre stochastique de l'utilisateur

Les modèles stochastiques purs ne prennent en compte la relation débit – temps de parcours. (Daganzo et Sheffi, 1977) ont introduit la notion « équilibre stochastique » (Stochastic User Equilibrium - SUE) qui permet de incorporer cette relation dans un modèle stochastique. Ils ont repris le premier principe Wardrop, chaque conducteur choisissant une option va effectivement ressentir le coût qui lui a fait choisir cette option. Pour ce faire, (Sheffi, 1985) ont développé un modèle appelant SUE, qui est considéré comme une extension des modèles équilibre usager (UE) classique. L'équilibre est caractérisé par la proportion d'affectation et le coût de chaque arc, et déterminé par un processus itératif, tel que l'algorithme de combinaison convexe.

### 5.5.5. Sur l'interprétation des perturbations aléatoires

#### Termes aléatoire Probit

Par sa définition, le terme aléatoire dans un modèle Probit Multinomial est une distribution normale. Cette distribution est paramétrée par le coefficient  $\beta$  - le rapport de la variance à la moyenne du coût. Le  $\beta$  signifie l'importance de la variance du terme aléatoire. Par un paramétrage du  $\beta$  les modélisateurs peuvent représenter le niveau de précision dans la perception du coût. (Maher et Hughes, 1995) utilise  $\beta=0$  pour la classe de voyageurs ayant un dispositif d'une formation dynamique sur le coût de déplacement, dans ce cas là, le terme aléatoire est nul, les voyageurs perçoivent le coût avec précision. Le modèle Probit devient déterministe.  $\beta=0.1$  est proposé pour la classe des voyageurs qui ne disposent pas aucune information, il signifie une certaine imprécision dans la perception du coût.

#### Termes aléatoires Logit

Dans un modèle Logit, le paramètre  $\theta$  signifie la variance du terme aléatoire de la distribution Gumbel :  $\theta = \frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma}$ . Certains modélisateurs proposent une approche de l'imprécision dans la perception des coûts en paramétrant  $\theta$ . Le  $\beta$  présenté ci-dessus est une fonction négative du niveau d'imprécision. Par opposition,  $\theta$  est une fonction positive au niveau de précision. (Maher, 1992) a simulé le choix avec les valeurs  $\theta$  différentes. Dans le cas où  $\theta=0$  le modèle affecte le trafic avec la même proportion sur les options. Quand on augmente  $\theta$  le Logit devient très proche un modèle déterministe.

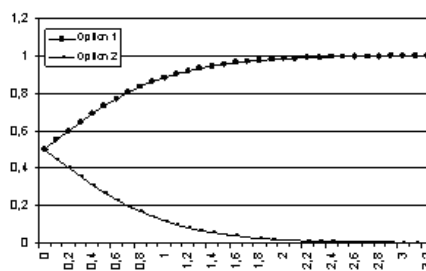


Fig. 5-6 : Répartition entre deux options en fonction du paramètre  $\theta$

La Fig. 5-6 représente la répartition entre deux options selon  $\theta$  :  $\theta=0$  les voyageurs ne distinguent pas les options ;  $\theta$  augmente, les voyageurs ne choisissent que l'option avec le moins coût.

### Comparaison entre Probit et Logit

Un terme aléatoire Logit représente la perturbation globale d'une option au niveau de chemins. Par opposition, un terme aléatoire Probit représente la perturbation locale au niveau d'arcs. (Sheffi, 1985) a effectué une simulation afin de comparer la capacité de représentation de la corrélation entre les chemins de recouvrement. Trois chemins reliant l'origine et la destination ont le même coût. Deux parmi eux ont une partie ensemble avec la proportion  $\rho$ , quand  $\rho=0$  les deux options sont indépendantes et elle s'approche identique s'il  $\rho$  augmente jusqu'à 1. Un modèle Logit donne la proportion d'usage de chaque option  $1/3$  indépendamment de  $\rho$  pendant que un modèle Probit donne la proportion d'usage de l'option en haut augmentant selon l'augmentation de  $\rho$ .

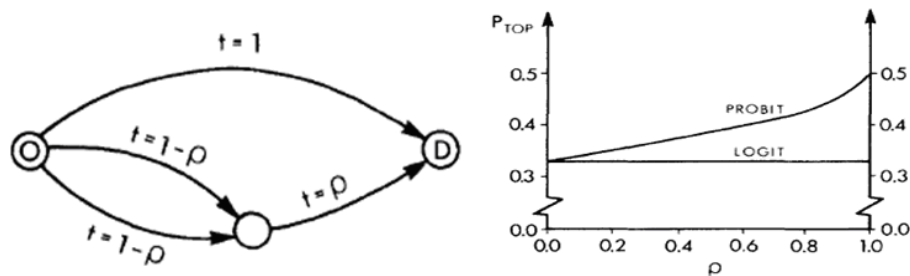


Fig. 5-7 : Comparaison Logit-Probit avec le problème de superposition. Source (Sheffi, 1985)

(Sheffi, 1985) a remarqué que les résultats d'affectation donnés par un modèle Probit semblent plus raisonnables que ceux du modèle Logit dans la considération du recouvrement.

### Discussion sur les composant d'un terme aléatoire

(Maher et Hughes, 1995) ont mis  $\beta=0$  pour la classe d'utilisateurs qui disposent d'un dispositif d'information dynamique. C'est-à-dire les voyageurs ayant de l'information dynamique perçoivent le coût sans imprécision. Ce cadre d'hypothèse est plus ou moins plausible dans le cadre d'une affectation du trafic en transport collectif (par exemple le métro) où l'exploitant est capable d'assurer un horaire exact et de diffuser aux usagers de l'information correcte sur cet horaire.

Ce cadre d'hypothèses devient moins raisonnable avec l'affectation du trafic routier où l'exploitant ne connaît pas exactement ce que se passera dans le système. Donc, il ne connaît pas précisément le temps de parcours (cf. §5.2). En fait, le terme aléatoire dans une fonction de coût généralisé représente deux types de perturbation :

- La perturbation objective reliant à la technique de comptage et prévision du temps de parcours, et

- La perturbation subjective reliant aux erreurs personnelles dans la perception. Donc ce composant représente aussi la variation de préférences entre les voyageurs.
- Le premier composant peut être diminué ou éliminé par l'information dynamique (quelle information ? quel système ?), le deuxième peut être diminué ou éliminé par une segmentation raffinée de la demande.

### Identification d'options et d'univers de choix

Les discussions précédentes, en particulier dans la section §5.2 nous ont montré que l'identification des ensembles des options de choix est vraiment importante. Les méthodes proposées par les modélisateurs portent deux objectifs : d'une part elles rendent un ensemble de choix plus réaliste, plus proche ce que les voyageurs perçoivent et elles donnent la performance à l'algorithme de calcul.

Au cours de nos lectures, en particulier la taxonomie des approches d'identification présentée par (Morikawa, Miwa *et al.*, 2005). Nous avons identifiés les problèmes principaux dans la modélisation de la disponibilité des options de choix : énumération des options et sélection des options.

## 5.6.MODELES STOCHASTIQUES AVANCES

Les modèles stochastiques de type Logit ou Probit nous permettent de relaxer les hypothèses que les usagers-décideurs connaissent parfaitement le réseau routier ainsi que les conditions du trafic et qu'ils sont des calculateurs hyperpuissant qui sont capables de procéder une comparaison de toutes les options de choix. (Ben-Akiva et Bierlaire, 1999) ont évoqué trois problèmes remarquables de l'affectation du trafic : (i) l'ensemble exhaustif des options de choix est en général grand, mais (ii) les décideurs ne considèrent pas tous les options physiquement disponibles et (iii) les options sont habituellement corrélées en raison des arcs communs.

Les modèles stochastiques avancés cherchent à mieux reproduire la limite des perceptions des options par les usagers par deux approches :

- limiter le nombre d'options de choix considérées par les usagers-décideurs (§5.6.1)
- Intégrer des facteurs de correction dans la fonction d'utilité afin de mieux (§5.6.2).

### 5.6.1.Sélection des options de choix

Les modèles les plus anciens adoptent énumèrent explicitement un ensemble exhaustif des options de choix ((Wardrop, 1952); (Fisk, 1980). Cette approche apporte une certitude de ne pas oublier aucune option mais n'est pas réaliste car elle ne peut pas représenter la capacité limite et la variation des voyageurs dans

la perception des options de choix particulièrement dans le contexte de choix d'itinéraire ainsi que la corrélation des options « similaires ». Elle engendre le risque de surestimer ou sous-estimer certaines options (Abraham et Coquand, 1961); (Dial, 1971); (Ben-Akiva et Bierlaire, 1999). Donc, il exige des méthodes afin de bien sélectionner telles ou telles options appartiennent à un ensemble de choix.

(Bovy et Stern, 1990) ont suggéré que une méthode d'identifier des ensembles de choix idéale devrait permettre de former pour chaque voyageur un ensemble personnalisé des options de choix qui correspondent totalement à ses caractéristiques.

### Approche déterministe

- Sélection par règles : une approche pour répondre au problème est de sélectionner les chemins de moindre coût. Les voyageurs sont supposés de ne considérer qu'un nombre limité de  $k$  chemins les plus courts (en coût, en temps ou en distance éventuellement) (Sakarovitch, 1968). Une version modifiée est de ne pas se limiter aux  $k$  – meilleures options mais plutôt aux options les meilleures, par exemple les options dont le coût est inférieur à  $(1 + \varepsilon)$  fois le plus petit coût (Jayakrisnan, Mahmassani *et al.*, 1994). On perd la certitude sur le nombre de chemins considérés mais le problème est de trouver un algorithme efficace pour déterminer ces presque meilleures options. Malheureusement, malgré son intérêt de calcul significatif, elle risque à la fois de surévaluer l'importance de certaines options mais aussi d'oublier certaines d'autres.
- Chemins raisonnables : (Dial, 1971) a introduit la notion « chemin raisonnable » : « un chemin ne revenant pas en arrière, il s'éloigne l'origine et s'approche la destination ». Plus précisément, à chaque nœud  $i$  entre la paire origine - destination, on définit  $p(i)$  et  $q(i)$  est successivement la distance plus courte de l'origine à  $i$  et celle de  $i$  à la destination. Sur le réseau les condition de l'arc  $e(i, j)$  fait partie un telle option si :  $p(i) < p(j)$  et  $q(j) < q(i)$ . Il est évident que la notion « chemin raisonnable » est utile dans l'élimination des options non éligibles mais en suite, (Daganzo et Sheffi, 1977) ont critiqué que la méthode de Dial peut oublier certaines options
- Contraintes globales : selon ses caractéristiques, un voyageur ne considère que les options qui répondent aux contraintes ce qu'il a posé avant. Par exemple : un conducteur âgé a l'intention de ne pas prendre d'autoroute (contrainte de nature de l'infrastructure); une jeune conducteur n'accepte que les itinéraires du quelle la vitesse moyenne est supérieure à 50 km/h ; certains conducteurs n'acceptent pas un coût de péage supérieur à 20 euros. Proposée premièrement par (Tversky, 1972), cette approche vise à éliminer des options significativement inéligibles par le paramètre  $A_n(i)$  de la considération de l'individu  $n$  sur l'option  $i$  :

$A_n(i)=1$  signifie l'option  $i$  est dans l'ensemble de choix de l'individu  $n$ , sinon  $A_n(i)=0$ . Et la formulation :

$$A_n(i)=1 \Leftrightarrow h_{ik}(X_i^k, v_{nk}) \geq 0 \forall k \quad (\text{eq. 5-15})$$

, où :

$h_{ik}$  est la fonction de contrainte

$X_i^k$  le  $k$ -ième attribut de l'option  $i$

$v_{nk}$  est la contrainte posée sur l'attribut  $k$  par l'individu  $n$

et l'ensemble de choix de l'individu  $n$ ,  $C(n)$

$C_n = \{i \in M | A_n(i)=1\}$ ,  $M$  est l'ensemble exhaustif des options

- Options remarquables : Afin d'éliminer les itinéraires qui ne sont pas choisis par les usagers en réalité, (Ben-Akiva, Bergman *et al.*, 1984) ont proposé une approche appelée « labeling ». Cette approche permet d'une part d'identifier des itinéraires vraiment choisis par les automobilistes, d'autre part de prendre en compte plusieurs critères de choix en dessous de temps de parcours. Tout d'abord, on a effectué une enquête questionnaire sur les voyageurs d'une paire origine – destination en demandant d'indiquer l'itinéraire choisi et de préciser les raisons sur lesquelles le voyageur a choisi cet itinéraire : temps de parcours, distance, type routier, paysage le long d'itinéraire, etc. L'ensemble des options de choix ne compte que des itinéraires observés par l'enquête. La fonction d'utilité est formulée en associant plusieurs variables. Les paramètres de la fonction d'utilité sont estimés selon l'importance des critères qui sont mesurées par le nombre d'itinéraires touché par le critère.

### Approches stochastiques

Les diverses approches déterministe sont rendre les ensembles de choix plus proche la perception des voyageurs en réalité. Cependant, la perception d'un ensemble de choix même pour un contexte de déplacement donné est variée et aléatoire parmi les voyageurs. Les modélisateurs développent des méthodes stochastiques afin de modéliser la perception des options au niveau plus individuel.

On suppose qu'un tel sous-ensemble  $C$  de l'ensemble exhaustif  $M$  peut être l'ensemble de choix de l'individu  $i$  avec une certaine probabilité. Le cadre d'une



modélisation stochastique de la disponibilité des options de choix a été proposé par Manski (1977) :

$$P_n(i) = \sum_{C \in G} P_n(i|C)P_n(C) \quad (\text{eq. 5-16})$$

où :  $P_n(i|C)$  est la probabilité que l'option  $i$  est choisie par l'individu  $n$  en supposant que  $C$  est l'ensemble de choix de  $n$  ;  $P_n(C)$  est la probabilité que le sous-ensemble  $C$  est l'ensemble de choix de l'individu  $n$ , peut être indiquée comme proportion fixe, ou fonction des caractéristiques socio-économiques, par exemple, revenu.

- Contraintes stochastiques : suivant le cadre présenté ci-dessus, (Ben-Akiva et Boccara, 1995) ont proposé de mettre des contraintes stochastiques afin d'identifier la probabilité d'un tel sous-ensemble  $C$  d'être un ensemble de choix de l'individu  $n$  en prenant des indicateurs de disponibilité,  $A_n(i)$  est un indicateur binaire 1 ou 0 qui signifie l'option  $i$  est considéré par l'individu  $n$  ou non.

$$A_n(i) = 1 \Leftrightarrow h_{ik}(X_i^k, v_{nk}) \geq \xi_{nk} \forall k \quad (\text{eq. 5-17})$$

Donc, la contrainte considéré par l'individu  $n$  sur l'attribut  $k$  est représenté non pas de manière déterministe comme précédemment mais de manière stochastique  $\xi_{nk}$  est une distribution logistique aléatoire avec moyenne nulle.

Et la probabilité que l'ensemble de choix  $C$  est considéré par un individu  $n$  :

$$P_n(C) = P_n(A_n(i) = 1 \forall i \in C \mid A_n(j) = 0 \forall j \in M \setminus C) \quad (\text{eq. 5-18})$$

- Modèle IAP Logit : d'autre côté, en ajoutant directement un paramètre  $\mu_n(i)$  la disponibilité perçue à la fonction d'utilité aléatoire, (Cascetta et Papola, 1998) a introduit IAP Logit modèle comme une méthode pour incorporer la connaissance des chemins sans avoir besoin d'une étape de modélisation des ensemble de choix dont la fonction de répartition du trafic :

$$\pi_n(i) = \frac{\mu_n(i)e^{V_i}}{\sum_{j \in M} \mu_n(j)e^{V_j}} \quad (\text{eq. 5-19})$$

, où :

M est l'ensemble exhaustif des chemins

$\mu_n(i)$  indicateur de disponibilité de l'option i perçue par l'individu n

Originellement,  $\mu_n(i)$  se présente de manière binaire : 1 signifie que l'option i est disponible et perçue par l'individu n ; 0 signifie l'option i est indisponible ou le décideur ne le connaît pas. En extension, si le modélisateur ne connaît pas  $\mu_n(i)$  de manière définitive, ce coefficient peut être décrit par une distribution Bernoullienne avec

$$\bar{\mu}_n(i) = \frac{1}{1 + \exp\left(\sum_{k=1}^K \gamma_k Y_{ink}\right)} \text{ où } Y_{ink} \text{ est k-ième variable relié à la disponibilité}$$

ou la perception de l'option i pour l'individu n et  $\gamma_k$  est un coefficient à estimer.

### 5.6.2. Modèles Logit avancés

Basé sur le modèle Logit présenté ci-dessus, nombreux modélisateurs ont renforcé ces problèmes en développant des versions Logit avancées.

#### Modèle C-Logit

Le problème de superposition des chemins est illustré en Fig. 5–8 ci-dessous :

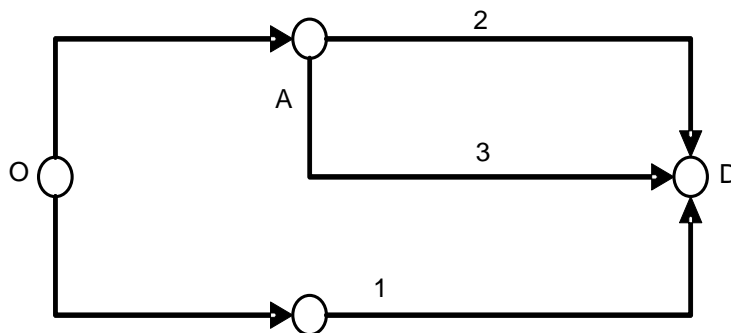


Fig. 5–8 : Problème de superposition entre les options

Dans cette situation, quand le nœud A s'approche le D, les deux options 2, 3 semblent identiques, on a deux options de choix pour effectuer un déplacement entre O-D mais quand le nœud A s'approche O, elles semblent indépendantes et on a trois options de choix. Et quand A reste au milieu entre O et D les options 2 et 3 ne peuvent pas être considérées indépendamment. Donc, le modèle Logit original surestime les options 2 et 3.

C-Logit (Commonality Logit) (Cascetta, Nuzzolo *et al.*, 1996) est une version modifiée du modèle Logit dans laquelle la partie déterministe de l'utilité

conventionnelle est diminuée d'un facteur correcteur CF (Commonality Factor). Le facteur CF réduit les utilités des options qui partagent une partie commune.

$$U_m = V_m - CF_m + \varepsilon_m \quad (\text{eq. 5-20})$$

, avec CF formulé en fonction des longueurs  $L_m$  des chemins et  $L_{mi}$  de leurs intersections, recouvrements :

$$CF_m = \beta \ln \sum_{i \in M} [L_{mi} / \sqrt{L_i L_m}]^\gamma \quad (\text{eq. 5-21})$$

Dans cette expression,  $\beta$  et  $\gamma$  sont des coefficients pour contrôler la corrélation entre les utilités des options.

La prise en compte des arcs en superposition suit une logique intuitive que s'il y a plus de recouvrement, on réduit plus l'utilité de chaque option. Cependant il n'est pas évident de contrôler le CF en fonction des arcs qui composent un chemin.

### Modèle Path-Size Logit

PS Logit représente un grand effort d'incorporer la théorie comportementale annoncée dans C-Logit. Comme le C-Logit, (Ben-Akiva et Bierlaire, 1999) ont proposé le modèle Path-Size Logit qui incorpore également un facteur de correction noté PS :

$$U_m = V_m + \beta \cdot PS_m + \varepsilon_m \quad (\text{eq. 5-22})$$

Le coefficient PS pour Path-Size (taille de chemin) est défini comme :

$$PS_m = \sum_{a \in M} \frac{L_a}{L_m} \cdot \frac{1}{\sum_{i \in M} \delta_{ai}} \quad (\text{eq. 5-23})$$

avec un arc traversé par le chemin  $m$ , de longueur  $L_a$ , et  $\delta_{ai}$  une variable indicatrice égale à 1 si  $a$  appartient au chemin  $i$  ou à 0 sinon. Pour chaque arc  $a$ , le partage de l'arc avec d'autres options dans l'ensemble des options de choix est pris en compte par le nombre d'options  $\sum_{i \in M} \delta_{ai}$  qui utilisent l'arc et PS est compris entre 0 et 1, d'autant plus faible que les arcs sont plus partagés.

D'autres formules pour PS ont été proposées par (Ramming, 2002), mais la définition d'origine semble la plus correcte, tant d'un point de vue théorique (Bierlaire et Frejinger, 2005) que pratique.

### Sous-réseau dans un modèle Path-Size Logit

Le modèle Path-Size Logit (PS-Logit) original ne représente pas la totalité de la corrélation entre les options, en particulier il n'intègre pas les affinités qualitatives entre les options. C'est pour quoi (Bierlaire et Frejinger, 2005; Frejinger et Bierlaire, 2007) ont introduit le concept de sous – réseau. Le principe est de sélectionner les routes les plus importantes du réseau, en appelant chacune un sous - réseau, et de dire que tous les itinéraires qui les utilisent sont corrélé même s'ils ne se superposent pas.

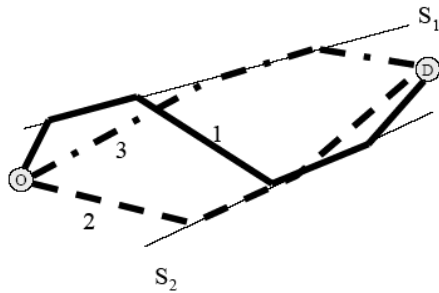


Fig. 5-9 : Sub Network (Bierlaire et Frejinger, 2005)

Leur méthode combine le modèle PS-Logit avec un modèle Error Component Logit (ELC). Dans le modèle ELC, le terme aléatoire  $\varepsilon$  est divisé en deux parties  $\xi$  et  $\nu$ .

$$U_m = V_i + \xi_m + \nu_m \quad (\text{eq. 5-24})$$

On reporte au niveau de  $\nu$  l'hypothèse d'une distribution Gumbel i.i.d entre les diverses options. Concernant la partie  $\xi$ , sa mission est de capturer la corrélation entre les options : une forme possible est

$$\xi = F.T.\zeta \quad (\text{eq. 5-25})$$

, avec F une matrice de taille  $M \times K$  qui relie les itinéraires aux K sous - réseaux avec pour terme générale un coefficient technique d'utilisation du sous – réseau par l'itinéraire : a priori,  $\sqrt{L_{mk}}$  avec  $L_{mk}$  la longueur du sous-réseau k dans l'itinéraire m.

, et T une matrice diagonale qui mesure par sous – réseau k l'intensité des variations internes, a priori par l'utilité de distance, sous forme d'un écart-type  $\sigma_k$

, et  $\zeta$  une variable aléatoire normale réduite  $N(0,1)$

La matrice de variance –covariance des utilités des options est alors :  $F.T.T^t.F^t$

### Logit emboîté (Nested Logit)

Le modèle Logit Emboîté est décrit premièrement par Ben-Akiva, et développé par un certain nombre des contributeurs : la maximisation d'utilité de Williams (1977), Daly et Zachary (1978) ; la formulation du réseau GEV (Generalized Extreme Value Network) de MacFadden (1977). Le Logit Emboîté est plus flexible que Multinomial Logit car il peut incorporer la similarité entre les options. Ce genre de modèles suppose que les chemins qui partagent certains nœuds et arcs ne sont pas considérés séparément par décideur et il fait son choix de manière hiérarchique : d'abord il choisit un groupes des options similaires et ensuite il choisira une option à l'intérieur du groupe choisi précédemment. Ce modèle est représenté comme une structure des arbres hiérarchique où les options similaires sont regroupées dans une boîte. Il restreint que une option ne peut appartenir qu'une boîte.

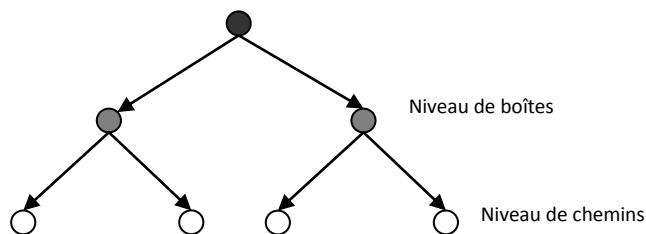


Fig. 5–10 : La hiérarchisation des options de choix dans le modèle Logit emboîté

La probabilité de l'option  $m$  appartenant de la boîte  $n$  est décrite comme suivant :

$$\Pr(m) = \Pr(n) \cdot \Pr(m|n) \quad (\text{eq. 5-26})$$

MacFadden (1978) a proposé une formule de la probabilité de choix :

$$\pi_m = \pi_n \cdot \pi_{m/n} = \frac{\left( \sum_{m' \in N_n} \exp(V_{m'} / \mu_n) \right)^{\mu_n}}{\sum_n \left( \sum_{m' \in N_n} \exp(V_{m'} / \mu_n) \right)^{\mu_n}} \cdot \frac{\exp(V_m / \mu_n)}{\sum_{m' \in N_n} \exp(V_{m'} / \mu_n)} \quad (\text{eq. 5-27})$$

où :  $\pi_n = \frac{\left( \sum_{m' \in N_n} \exp(V_{m'} / \mu_n) \right)^{\mu_n}}{\sum_n \left( \sum_{m' \in N_n} \exp(V_{m'} / \mu_n) \right)^{\mu_n}}$  est la probabilité de choix de la boîte n ;

$\pi_{m/n} = \frac{\exp(V_m / \mu_n)}{\sum_{m' \in N_n} \exp(V_{m'} / \mu_n)}$  est la probabilité de choix de l'option m à partir de la

boîte n.  $N_n$  est l'ensemble des options de la boîte n et  $\mu_n$  est un paramètre relié à la boîte n.

On remarque que dans le cas où  $\mu_n = 1 \forall n$ , le Logit Emboîté devient le Multinomial Logit.

### Réseau GEV

Dans un problème de choix d'itinéraire, les corrélations entre les options sont associées intuitivement aux portions communes, comme dans le modèle C-Logit ou Path-Size Logit. La considération des sous réseaux dans le modèle Path-Size redonne un caractère plus qualitatif à la confrontation des options : chaque sous réseau s'interprète comme un groupe auquel une option est rattachée de manière totale ou ponctuelle.

Dans le modèle Logit Emboîté, les options sont structurées dans une hiérarchie en arbre, et la corrélation de deux options provient de leur itinéraire commun dans l'arbre depuis la racine jusqu'au nœud d'embranchement où les deux options commencent à se différencier l'une à l'autre. Une option appartient à une boîte de manière binaire absolue ou nulle.

Les généralisations du modèle Logit Emboîté pour un choix discret quelconque portent sur les notions de groupe d'options et d'appartenance : on considère des groupes d'option en relation les uns aux autres sous des formes plus complexes que la hiérarchie en arbre ; et on module le degré d'appartenance d'une option à un groupe, en donnant aussi la possibilité à une appartenir à plusieurs groupes éventuellement à recouvrement partiel.

Small (1987) a été le premier à considérer des groupes aux recouvrements non triviaux et à moduler le degré d'appartenance  $\alpha$  d'une option à un groupe, dans

son modèle « Logit ordonné ». Vovsha (1997) a introduit le modèle Cross-Nested Logit dans le quel une options peut avoir plusieurs rattachements directs à des nœuds d'embranchement directs à des nœuds d'embranchement situés aux niveaux supérieur dans la hiérarchie. Il l'a développé en 1998 avec Bekhor en créant le modèle Link-Nested Logit (CNL). Il y a eu d'autres versions du modèle CNL, comme celles de Ben-Akiva et Bierlaire (1999), Papola (2000), Abbe et al. (2005) ou Papola et Marzano (2005), entre autres.

Bierlaire (2002) a systématisé la construction d'un treillis, sous le nom de Network GEV (Generalized Extreme Value). Daly et Bierlaire (2006) se sont rejoint pour donner une présentation rigoureuse et clarifiée de leur modèle.

Le modèle de Network GEV est en fait un cadre de modélisation pour obtenir un modèle de choix discret sous la forme GEV, en contrôlant les relations entre les options et particulièrement les corrélations.

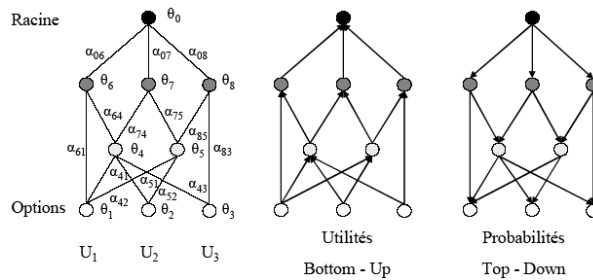


Fig. 5-11 : Réseau GEV

McFadden (1978) avait introduit le modèle GEV (*Generalized Extreme Value*) pour inclure à la fois le Logit Multinomial et le Logit Emboîté. Cependant, le Logit Emboîté restait la seule forme d'application jusqu'aux généralisations que nous venons d'évoquer.

Rappelons d'abord qu'un modèle GEV repose sur une fonction  $G$  de  $\Re^{+I} \rightarrow \Re$ , à valeurs positives ou nulles, infinie à l'infinie, homogène de degré  $\theta$ , et infiniment dérivable avec des dérivées partielles de signe positif à tout ordre impair et négatif à tout ordre pair.

Alors, pour  $x = (x_i)_{i \in I}$  et  $y = (y_i)_{i \in I} = (\exp(x_i))_{i \in I}$ , les fonctions

$$\pi_i(x) = \frac{y_i}{\theta \cdot G(y)} \cdot \frac{\partial G(y)}{\partial y_i} \quad (\text{eq. 5-28})$$

peuvent servir à modéliser des parts modales pour des options  $i \in I$ , car celles sont non-négatives et leurs sommes vaut 1. On interprète alors  $x_i$  comme l'utilité déterministe de l'option  $i$ , et l'utilité maximale moyenne est

$$V = \frac{1}{\theta} \ln G \quad (\text{eq. 5-29})$$

Daly et Bierlaire (2006) ont indiqué comment construire récursivement une fonction GEV et treillis, en considérant à chaque nœud d'embranchement,  $n$ , une fonction GEV qui est une combinaison linéaire à coefficients positifs de fonctions GEV issus des nœuds  $m$  embranchés sur  $n$ .

Chaque option  $m$  embranchée sur le nœud  $n$  avec un degré d'appartenance  $\alpha_{m/n}$  et une utilité déterministe  $V_m$ , est traitée comme une option dans un choix discret Logit Multinomial de paramètre  $\theta_m$ . Au nœud de choix  $n$ , l'utilité est une variable aléatoire distribuée Gumbel de paramètre  $\theta_m$  est de moyenne

$$V_n = \frac{1}{\theta_m} \ln \sum_{m \rightarrow n} \alpha_{m/n} \exp(\theta_m V_m) \quad (\text{eq. 5-30})$$

Le traitement local en  $n$  détermine les probabilités conditionnelles  $\pi_{m/n}$  branches :

$$\pi_{m/n} = \frac{\alpha_{m/n} \exp(\theta_m V_m)}{\sum_{m' \rightarrow n} \alpha_{m'/n} \exp(\theta_m V_{m'})} \quad (\text{eq. 5-31})$$

Pour obtenir les parts modales des options, ou des groupes, on répartit la probabilité totale récursivement depuis la racine du treillis : le nœud  $m$  reçoit de ses parents  $n$  la probabilité totale

$$\pi_m = \sum_{n \leftarrow m} \pi_n \cdot \pi_{m/n} \quad (\text{eq. 5-32})$$

De manière équivalente, cette probabilité se décompose selon les chemins  $r$  qui conduisent de la racine au nœud le long du treillis :

$$\pi_m = \sum_{r: o \rightarrow m} \pi_r, \text{ avec } \pi_r = \prod_{a \in (n, m) \in r} \pi_{m/n} \quad (\text{eq. 5-33})$$

Le modèle Network GEV n'a pas encore été appliqué sous ce nom mais les modèles qu'il généralise, ont déjà reçu de nombreuses applications : non seulement le Logit Emboîté qui est désormais bien connu mais aussi le modèle CNL.

### 5.6.3. Modèle Prix-Temps stochastique

Suite au modèle Prix – Temps à coût généralisé, (Leurent, 1996) a proposé un modèle Prix – Temps stochastique. Un cadre général serait de considérer des



coefficients d'arbitrage  $\alpha_m^k$  distribués selon une fonction de répartition. A parmi les individus et portant sur les attributs  $Z_m^k$  par opposition aux coefficients ponctuels  $\beta_m^k$  des attributs  $X_m^k$  de l'option  $m$ .

La fonction d'utilité de l'option  $m$  dépend à la fois de l'individu et donc d'un arbitrage particulier  $\alpha = (\alpha_m^k)_{k,m}$ , et de l'aléa  $\omega$  dans le terme aléatoire  $\varepsilon_m$  :

$$U_m(\alpha, \omega) = \left( \sum_k \alpha_m^k Z_m^k \right) + \left( \sum_k \beta_m^k X_m^k \right) + \varepsilon_m \quad (\text{eq. 5-34})$$

Sachant l'arbitrage  $\alpha$ , la part de marché de l'option  $m$  est encore :

$$\pi_m(\alpha) = \Pr(\omega : U_m(\alpha, \omega) > U_i(\alpha, \omega) \forall i \neq m) \quad (\text{eq. 5-35})$$

Et sur l'ensemble des arbitrages, la part de marché est :

$$\begin{aligned} \pi_m &= \Pr(\alpha, \omega : U_m(\alpha, \omega) > U_i(\alpha, \omega) \forall i \neq m) \\ &= \int \pi_m(\alpha) dA(\alpha) \end{aligned} \quad (\text{eq. 5-36})$$

## 5.7. MODELES D'APPRENTISSAGE

Comme discuté dans la section §5.2, les modèles de choix d'itinéraire présentés précédemment s'appuient sur une hypothèse que les décideurs changent leur comportement instantanément qui correspond aux conditions du trafic actuelles et indépendamment ce que s'est passé. Les psychologues ont suggéré que dans le cas où un voyageur effectue régulièrement le même trajet, il nous exige un tel modèle capable d'incorporer le processus d'apprentissage des voyageurs le long du temps.

Les modélisateurs ont introduit certains modèles en supposant que les conducteurs ont une stratégie de décision adaptive : la prise de décision s'appuie non seulement sur la perception immédiate mais aussi sur les expériences perçues dans le passé. Un nombre des modèles sont proposé à représenter le choix dynamique d'itinéraire avec l'effet « jour à jour ». (Daly, Hess *et al.*, 2005) ont catégorisé les modèles de ce genre en 3 groupes :

### 5.7.1. Approche « moyenne pondérée »

En général, cette approche suppose que le voyageur formule sa perception du temps de parcours pour le déplacement courant basé sur la moyenne pondérée des temps de parcours expérimenté dans les périodes précédentes. La formule basique du modèle est présentée comme suivant :

$$\hat{C}_r^{i,t} = \sum_k^{t-1} w_k(t-1) C_r^{i,k} \quad (\text{eq. 5-37})$$

, où :

$\hat{C}_r^{i,t}$  est le temps de parcours de l'option r perçu par l'individu i avant de prendre décision pour le temps t.

$C_r^{i,k}$  est le temps de parcours effectif de l'option r dans la période k,

$w_k(t-1)$  sont les coefficients non négatifs satisfaisant  $\sum_k^{t-1} w_k(t-1) = 1$

Un nombre des modèles ont été proposé basés sur l'équation ci-dessus. Cependant, ils contiennent des différents termes dans les hypothèses sur le stockage des temps de parcours dans le mémoire, la longueur de la mémoire et les termes aléatoires.

(Horowitz, 1984) a proposé trois modèles d'apprentissage dans lesquels les voyageurs sont supposés d'avoir une mémoire illimité. Les deux premiers modèles supposent que les voyageurs peuvent capter de l'information sur tous les temps de parcours des options choisies ou non choisies pendant que le troisième modèle suppose que les voyageurs ne peuvent capter que de l'information sur les options expérimentées par eux-mêmes. (Cascetta, 1989) a rendu le modèle plus flexible en considérant que les voyageurs ne peuvent traiter que une mémoire of nombre fini des temps de parcours. En revanche, il a supposé encore que les voyageurs connaissent même les temps de parcours des options non choisies par lui. Plus récemment, (Ettema, Timmermans *et al.*, 2003) ont proposé des modèles qui permettent d'une segmentation de voyageurs. Les coefficients pondérés sont interprétés de manière adaptive aux comportements de chaque classe de voyageurs.

Malgré que ce genre de modèles soit largement appliqué, on a remarqué que les études empiriques reliées sont moins investies (Jotisankasa et Polak, 2005). Une autre faiblesse du modèle montrée par (Iida, Akiyama *et al.*, 1992) est que le modèle peut ne refléter pas la réalité car d'autres facteurs, tels que la magnitude et la divergence entre les temps de parcours estimé et celui effectif semble important.

### 5.7.2. Approche « espérance adaptive »

Cette approche est de supposer que le décideur met à jour sa perception du temps de parcours en basant sur l'écart entre le temps de parcours estimé (avant de décision) et celui réalisé par lui-même pour le déplacement précédent :

$$\hat{C}_r^{i,t} = \tau C_r^{i,t-1} + (1-\tau)\hat{C}_r^{i,t-1} \quad (\text{eq. 5-38})$$

, où  $\tau$  est le paramètre d'apprentissage dans la période  $t$  et  $0 \leq \tau \leq 1$ .

Notons que quand on reprend le modèle précédent « moyenne pondérée » avec  $w_k(t-1) = \tau(1-\tau)^{t-k-1}$ , nous aurons la formule basique du modèle « espérance adaptive ».

Quelques études ont utilisé ce modèle pour analyser le processus de mise à jour la perception sur le temps de parcours. (Reddy, Yang *et al.*, 1995) ; (Emmerink, Axhausen *et al.*, 1995)) ; (Iida, Akiyama *et al.*, 1992) ont introduit des versions modifiées en ajoutant un constant ou un biais de perception.

Grâce à sa simplicité conceptuelle et son interprétation psychologique plausible, il est répandu largement. Cependant, son inconvénient est que la valeur du temps de parcours perçu au moment courant peut être trop compensée par celles du passé.

### 5.7.3. Approche bayésienne

L'approche bayésienne destinée à modéliser la perception du coût le long du temps est proposée par (Jha, Madanat *et al.*, 1998); (Leurent, 2001) et (Chen et Mahmassani, 2004). Dans cette approche, la moyenne du temps de parcours et les temps de parcours expérimentés perçus par chaque décideur sont représentés comme des variables aléatoires, dont la variance est l'indicateur de la confiance des sources d'information. (Jha, Madanat *et al.*, 1998) ont proposé un modèle où les voyageurs sont supposés de mettre à jour leur perception chaque jour pendant que (Chen et Mahmassani, 2004) supposent que les voyageurs peuvent ne pas mettre à jour leur perception chaque jour et ils ont proposé trois mécanismes différents pour le démarrage, la terminaison et la mise à jour.

## 5.8. CONCLUSION DU CHAPITRE

Au cours de deux dernières décennies, nous avons constaté une forte évolution des modèles d'affectation du trafic. Nous avons établi une revue bibliographique sur l'ensemble des modèles d'affectation : non seulement des modèles déterministes et stochastiques de base mais aussi des modèles avancés dans lesquels la représentation de la connaissance imparfaite des usagers lors de leurs déplacements est améliorée.

Malgré que nombreux modèles existent, les modélisateurs ne savent pas encore appréhender les comportements humains des voyageurs de manière vraiment réaliste. Cette faiblesse est à cause d'une part par une connaissance limitée de la science cognitive et comportementale, d'autre part par la complexité en termes mathématiques et informatiques et en fin le manque des données nécessaires.

Passant du niveau théorique au niveau pratique, les modèles plus fidèles en termes de représentation des comportements sont souvent plus complexe et plus difficiles à manipuler/ paramétrer. Comme chaque modèle ne bien représente que certaine situation de choix, on sait rendre une modélisation plus réaliste en combinant de différentes modèles présenté dans ce chapitre grâce à la segmentation de la demande.

## **Partie III. Modélisation des effets de l'information routière**



En cette troisième partie, nous allons développer notre cadre de modélisation des effets de l'information routière sur la base des revues bibliographiques présentées en partie II. La partie comprend deux chapitres.

Dans le chapitre 6, nous allons présenter le cadre de modélisation et préciser hypothèses concernant, concernant l'offre de transport, la demande, les différents comportements en fonction de l'accessibilité à l'information, l'équilibre bi-niveau. Ce cadre de modélisation sera appliqué pour analyser l'équilibre de l'utilisateur en présence de l'information. Certaines hypothèses simplificatrices seront également adoptées afin de faciliter le traitement analytique. En fin, une analyse paramétrique sera menée afin de déterminer la sensibilité de chaque variable aux effets de l'information sur le trafic : forme de perturbation, niveau de congestion, paramètre du réseau, etc.

Dans le chapitre 7, nous allons élargir le cadre de modélisation présenté au chapitre 6 afin d'appréhender les comportements de coopération des usagers. Parmi de nombreux motifs de comportement modélisé, les trois motifs l'équilibre de l'utilisateur, l'optimum du système et la coopération entre les usagers informés seront analysés.





## Chapitre 6. Effets de l'information routière sur l'équilibre de l'utilisateur.

---

### 6.1. INTRODUCTION

#### 6.1.1. Contexte

Depuis des années, les services d'information de trafic connaissent un constant développement dans une variété de formes : carte routière, panneaux de signalisation, panneaux à messages variables (PMV), radio trafic, etc. En plus, les services d'information du trafic par téléphone, Internet ou dispositif nomade fournissent des informations avancées qui sont personnalisées en fonction du besoin individuel. En fait, l'utilisateur choisit son itinéraire ou son heure de départ en fonction de l'expérience ainsi que de l'information dont qu'il dispose (Miles et Chen, 2004), (Leurent, 2004).

Par son caractère stochastique, la congestion non-récurrente ne peut pas être détecté/anticipé par l'utilisateur individuel. Grâce à l'avancement des technologies, notamment en télécommunication, informatique et technique de mesure et de traitement du transport routier, l'opérateur est devenu capable de détecter les perturbations afin de mesurer et même à anticiper les conditions de circulation pour mieux réagir. En outre, des informations sur les conditions de circulation peuvent être communiquées aux usagers routiers. La disposition de l'information pointue permet à l'utilisateur d'améliorer son choix en adaptant sa décision aux perturbations présentes sur le réseau. Au niveau de réseau, il est espéré que les bénéfices provenant des services d'information de trafic ne sont pas limités à un gain individuel mais également étendues à un avantage pour l'ensemble du système car les décisions individuellement optimales pourront contribuer à améliorer la performance globale du réseau.

Le trafic sur un réseau routier est composé par la circulation de véhicules routiers en nombre important. Dans la limite des modalités d'exploitation, des règles de circulation, et surtout des conditions de trafic, chaque usager-automobiliste du réseau choisit son horaire de départ, son allure de déplacement, son itinéraire. Réciproquement, les choix de déplacement de l'ensemble des usagers conditionnent la répartition de la demande sur le réseau, puis les conditions de circulation. Le réseau routier subit souvent la congestion récurrente, i.e. l'excès de la demande par rapport l'offre, mais aussi la congestion non-récurrente, i.e. les perturbations exogènes telles que les incidents, les accidents, les conditions météorologiques difficiles ou d'autres aléas.

Par son caractère stochastique, la congestion non-récurrente est difficile voire impossible d'être détectée par un individu avant son déplacement. Grâce à

L'avancement des technologies, notamment en informatique, télécommunication et techniques de recueillement et de traitement des données routières, l'exploitant est devenu capable de détecter les perturbations, de mesurer l'ampleur de leurs conséquences et d'anticiper l'état du trafic pour mieux adapter les mesures de gestion du trafic. L'information concernant les conditions actuelles ou prévisionnelles de trafic peut être également communiquée aux usagers.

L'utilisateur effectue ses choix de déplacement en fonction des conditions de circulation et de l'état du trafic, ou plutôt de la connaissance dont il dispose à ce sujet, d'après son expérience et grâce à l'information routière qui lui est accessible (*cf.* Chapitre 4).

L'information routière est un service en constant développement, sous des formes variées : sur la route les automobilistes trouvent des panneaux de signalisation (statique), des panneaux à messages variables (PMV), et les radios trafic. De plus, les cartes routières, les services d'information par téléphone ou internet, les dispositifs de guidage par équipement embarqué, apportent des informations avancées qui sont adaptables aux besoins individuels (« customisables »). Et l'obtention d'une information pointue permet à l'utilisateur routier d'effectuer ses choix de manière opportuniste, en s'adaptant aux circonstances particulières du réseau lors de son déplacement : par adaptation en route ou antérieurement au déplacement (*cf.* Chapitre 4).

L'information procure à l'utilisateur un *profit individuel*, en lui permettant d'optimiser ses choix. Plus particulièrement, en cas de perturbation l'information dynamique permet à l'utilisateur de réagir, et de réduire son exposition à une source de gêne telle qu'un retard : l'utilisateur peut économiser du temps, pas forcément par rapport aux conditions « normales » qu'il escomptait, mais par rapport aux effets de la perturbation qu'il subirait s'il ne s'y adaptait pas. Nous nous concentrons ici sur le gain en temps, sans compter le gain de confort ni le gain de sécurité en cas d'accident ou en situation accidentogène. Ainsi l'utilisateur peut retirer un profit individuel de l'information dynamique, et ce d'autant plus qu'il est mieux équipé pour en recevoir : cela justifie son investissement dans un équipement individuel, investissement à amortir sur toutes les circonstances d'utilisation.

Au *plan collectif*, le profit dépasse la somme des profits individuels, parce que comme le comportement d'ensemble du trafic est la somme des comportements individuels, l'information de régulation et d'orientation induit des effets collectifs, susceptibles de réduire considérablement l'ampleur et la gravité d'une perturbation. Cela justifie d'investir dans des équipements collectifs d'information, depuis les capteurs de trafic sur le réseau jusqu'aux médias pour diffuser de l'information routière.

La diffusion de l'information dynamique de trafic aux usagers constitue d'une thématique complexe dont l'objectif, contenu, cible, niveau de diffusion, support, etc. en particulier les interactions entre les sources de la congestion, les lois physiques de l'écoulement et les comportements des usagers et d'autres mesures d'exploitation appelle à un modèle pertinent pour pouvoir analyser les phénomènes complexes puis acquérir une meilleure compréhension sur ce sujet.

### 6.1.2.Revue bibliographique

Dans la pratique d'exploitation du trafic routière, les conséquences d'un cas de perturbation, par exemple un accident, en présence de la congestion récurrente, de l'information routière, et d'autres mesures de gestion sont souvent analysées par simulation microscopique (Al-Deek, Khatkhaty *et al.*, 1998), (Hu, Wang *et al.*, 2005) et (Levinson, Gillen *et al.*, 1999; Levinson, 2003). Les indications données par simulation microscopique sont parfois peu pertinentes et peu conclusives parce que :

- La simulation microscopique ne reproduit que certains scénarii de perturbation, par l'exhaustivité des cas possibles.
- La simulation microscopique n'est pas capable de reproduire l'état d'équilibre du trafic donc de prendre en compte les effets des perturbations, de l'information routière et d'autres mesures sur le trafic pour le long terme.

Au plan de modélisation, la distinction des sources de congestion et leurs interactions avec l'information dynamique de trafic a été correctement traitée pour le choix d'horaire de départ par (Noland, Small *et al.*, 1998), (Leurent, 2001; Leurent, 2004), (Saito, Yasui *et al.*, 1998) bien que l'approche analytique ne inclut pas la réaction des usagers à la congestion.

Tout fois, concernant le choix d'itinéraire, la simulation dynamique des années 2000s (Lo et Szeto, 2004), a pris le même cadre d'hypothèses que la simulation statique des années 1990s (Al-deek et Kanafani, 1989) (Van Vuren et Watling, 1991; Maher et Hughes, 1995), (Zhang et Verhoef, 2006) en supposant que les usagers informés perçoivent un temps de parcours déterministe pendant que les usagers non-informés perçoivent un temps de parcours stochastique. En fait, cette définition est exactement au contraire de la nature stochastique de la dynamique des perturbations éventuelles sur un réseau routier et de la définition de l'information dynamique : « *l'information routière sur l'état de la circulation et les perturbations auxquelles les automobilistes sont confrontés* » (Sétra, 1996).

La diffusion de l'information de trafic aux usagers constitue d'une problématique complexe dont l'objectif, contenu, cible, niveau de diffusion, support de diffusion, type d'équipement, etc. en particulier les interactions entre les sources de la congestion, les lois physiques de l'écoulement et la diffusion de

l'information appelle à un modèle pertinent pour pouvoir simuler et analyser les phénomènes complexes puis acquérir une meilleure compréhension sur ce sujet.

La distinction des sources de congestion et leurs interactions avec l'information dynamique de trafic a été correctement traitée pour le choix d'horaire de départ par (Noland, Small *et al.*, 1998), (Leurent, 2001; Leurent, 2004) bien que l'approche analytique ne inclut pas la réaction des usagers à la congestion. Tout fois, concernant le choix d'itinéraire, la simulation dynamique des années 2000s (entre autres (Lo et Szeto, 2004)) a pris la même cadre d'hypothèses que la simulation statique des années 1990s (Van Vuren et Watling, 1991; Maher et Hughes, 1995) en supposant que les usagers informés perçoivent un temps de parcours déterministe pendant que les usagers non-informés perçoivent un temps de parcours stochastique. En fait, cette définition est exactement au contraire de la nature stochastique de la dynamique des perturbations éventuelles sur un réseau routier.

Les perturbations sur le réseau, en particulier le lien entre les perturbations et l'information dynamique sont encore mal-modélisés avec quelques contributions analytiques. La plupart des travaux sur ce sujet est par simulation numérique (Al-Deek, Khattak *et al.*, 1998), (Hu, Wang *et al.*, 2005) et (Levinson, Gillen *et al.*, 1999; Levinson, 2003) qui fournit une représentation très limité des cas perturbés ainsi qu'une compréhension analytique modeste.

### **6.1.3.Objectif**

Notre objectif dans ce chapitre est de concevoir une modélisation rigoureuse des effets de l'information dynamique sur le trafic en tenant en compte

- La congestion en distinguant des perturbations exogènes de la congestion récurrente.
- Les comportements des usagers en distinguant le comportement des usagers informés de celui des usagers non-informés

Nous nous interrogeons sur la performance effective d'un certain niveau de diffusion de l'information et d'un certain équipement de réception de l'information pour un usager et plus largement sur l'intérêt collectif dans la disposition d'un certain système d'information. Notre questionnement est de nature économique : quel profit peut être tiré d'un équipement/ d'un système d'information ?

Nous ne cherchons pas à quantifier les coûts et les profits d'un système particulier mais à modéliser un aspect crucial et jusqu'ici trop méconnu dans les évaluations de système, à savoir la structure probabiliste des perturbations et l'influence du niveau de diffusion de l'information sur la résilience globale du flux aux perturbations.

Notre philosophie est de développer un modèle des perturbations, de l'équipement individuel et des réactions aux perturbations suffisamment explicite et réaliste pour ces aspects sous une forme aussi simple possible que possible sans en altérer la nature. Nous appliquons ce modèle à un réseau simple de deux routes parallèles avec deux classes d'utilisateurs respectivement équipées ou non pour simuler les réactions aux perturbations et le profit pour la collectivité, évalué simplement en gain de temps.

#### **6.1.4.Méthode**

Notre méthode est donc la modélisation probabiliste du trafic, au but d'analyse économique. Notre modèle est conçu afin d'explicitement : le trafic sur un réseau, les conditions de circulation avec l'influence de la congestion et l'éventualité de perturbations, la composition du trafic par des utilisateurs disposant ou non d'équipement d'information et qui choisissent leur itinéraire en fonction de l'information.

L'équipement d'information permet aux utilisateurs équipés de connaître le coût perturbé (temps perturbé) ; tandis que les utilisateurs non équipés choisissent leur itinéraire en fonction seulement d'une connaissance en moyenne.

Avec ce modèle, nous simulons les effets du volume de demande sur la congestion, et du taux d'équipement sur la résilience du trafic aux perturbations : nous montrons qu'un certain taux d'équipement peut suffire à éliminer l'effet des perturbations.

De plus nous distinguons notre modèle des approches précédentes visant le même objectif : nous critiquons les hypothèses du modèle de Maher et Hughes (1995) et nous en montrons les effets irréalistes ; nous montrons aussi qu'un traitement trop grossier des hypothèses de modélisation, aboutit à des conclusions erronées.

Afin de conserver l'essence physique et économique de la problématique, nous traitons le modèle de manière formelle, analytique ce qui permet de tracer le rôle de chaque hypothèse.

#### **6.1.5.Contenu**

Ce chapitre comprend 4 sections hors l'introduction et conclusion. Nous commençons par formuler le jeu d'hypothèses concernant le réseau, le phénomène de congestion, le temps de parcours, les aspects aléatoires des perturbations, les classes d'utilisateurs et leur comportement §6.2. Nous traitons analytiquement le problème d'équilibre du trafic en section §6.3. En §6.4, nous spécifions notre hypothèse concernant la distribution aléatoire des perturbations. Et en fin, nous effectuons des simulations numériques en §6.5.

## 6.2. FORMULATION DES HYPOTHESES

Dans cette section, nous posons les hypothèses du côté de l'offre de transport concernant le réseau, la congestion et les perturbations aléatoires §6.2.1. Puis en sous-section §6.2.2, nous décrivons la structure de la demande, à savoir le volume total et le taux d'équipement, le comportement des usagers correspond à la classe qu'il appartient.

### 6.2.1. L'offre de transport

#### Réseau

Nous considérons un réseau routier qui se compose des arcs  $a \in A$ , l'ensemble des arcs, avec les nœuds  $n \in N$ , l'ensemble des nœuds. *A priori*, les itinéraires se composent de sections de route ; chaque section supporte un niveau de trafic qui en induit le coût moyen pour un usager, selon le modèle de congestion.

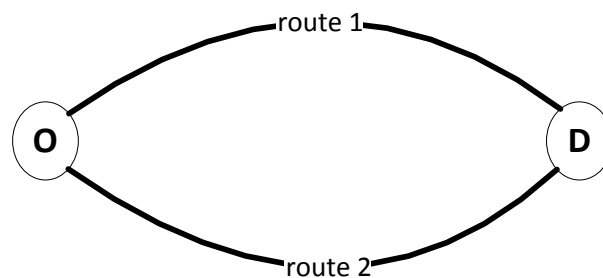


Fig. 6-1 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination

Notre application se limite à un cas d'école : un réseau composé de deux routes parallèles desservant une relation entre un sommet d'origine et un sommet de destination (Fig. 6-1).

#### La congestion : un modèle statique par section

Sur un réseau de transport, la congestion est le phénomène de trafic selon lequel une concentration accrue de mobiles, par le jeu de leurs gênes mutuelles, dégrade la vitesse de chacun et la qualité de service pour tous.

Ce phénomène a été abondamment étudié au niveau local d'une section routière : on distingue classiquement un régime saturé, dans lequel les véhicules forment une file d'attente sans « trous » dans le trafic, file dont l'écoulement est principalement déterminé par les conditions de capacité en aval ; et un régime non saturé, appelé fluide même s'il comporte des interactions entre les véhicules.

Fig. 6–2 montre d'une part des observations conjointes de temps et de débit sur une section autoroutière par période de 6 minutes, d'autre part une fonction temps-débit classique (<sup>1</sup>).

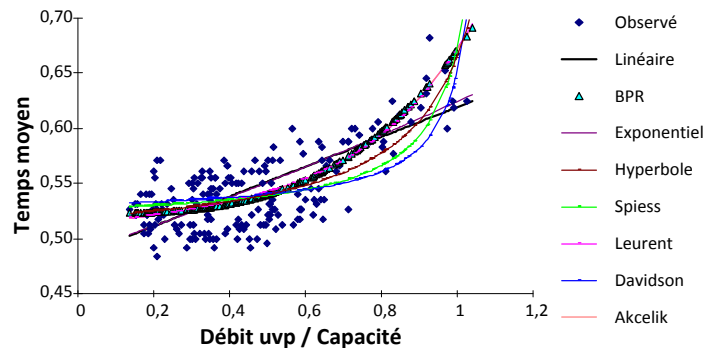


Fig. 6–2 : Observation débit temps unitaire et plusieurs modèle débit-temps. Source : Leurent, 2006

Nous renvoyons le lecteur intéressé à la modélisation probabiliste du temps de parcours et du trafic, à (Leurent, 2001) et à l'article associé (Leurent, 2006) ou (Singh, 1999), (Fosgerau et Fukuda, 2008)

Sur chaque arc  $a$ , le débit en arc  $x_a$  induit un temps individuel  $T_a$  subi des effets de congestion, qui se modélise par une fonction temps-débit :  $T_a = \tilde{t}_a(x_a)$ , une fonction mathématique croissante entre le temps de parcours individuel moyen et le débit en véhicules sur la section. C'est le modèle classique de congestion dans les modèles statiques d'affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau, qui demeurent les plus utilisés dans les études de planification. Pour l'instance, prenons une fonction affine linéaire, comme suivant :  $\tilde{t}_a(x_a) = \alpha_a + \gamma_a x_a$  dans laquelle  $\alpha_a$  signifie le temps à vide et  $\gamma_a$  est la sensibilité du temps individuel à la congestion (Fig. 6–3). Cette hypothèse correspond au régime non saturé, pas au régime saturé dans lequel le débit est contraint par la capacité de poursuite.

<sup>1</sup> La fonction puissance proposée par le BPR (Bureau of Public Roads, le Sétra américain) a été largement utilisée depuis les années 1960 : sa formule  $T(x) = T_0[1 + \alpha \cdot (x/\kappa)^\beta]$  relie le temps moyen  $T(x)$  en charge sous le débit  $x$ , au temps libre (à trafic nul)  $T_0$ , au taux de charge  $x/\kappa$  avec  $\kappa$  la capacité d'écoulement, et  $\alpha$  et  $\beta$  deux paramètres de forme

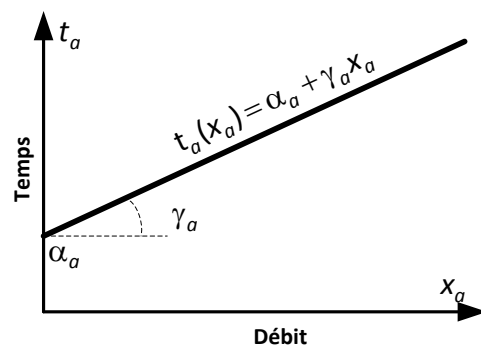


Fig. 6-3 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps

### Aspects aléatoires : les perturbations du coût

Le temps de parcours d'une section routière est une notion susceptible de plusieurs acceptions :

- (i) Le temps passé par un usager lors d'un déplacement réalisé est une grandeur physique objective.
- (ii) Le temps de parcours estimé avant réalisation, même par un ingénieur disposant de toute l'information a priori possible, est une grandeur physique entachée d'incertitude car exposée à diverses perturbations.
- (iii) Le temps perçu par l'utilisateur est empreint de subjectivité, même si l'utilisateur l'estime en unités physiques.

Le temps de parcours, comme un emploi particulier du budget temporel dont dispose l'utilisateur, est une consommation de ressource économique, et il revêt une signification économique dans les choix de déplacement.

Nous nous intéressons ici au temps de parcours comme grandeur physique, soit avant soit après réalisation du déplacement. Nous supposons que l'opérateur du réseau et le fournisseur d'information mesurent précisément le temps et informent exactement les utilisateurs équipés d'un dispositif individuel d'information.

Nous réduisons la subjectivité de l'individu à son statut d'équipement. Nous assimilons le temps estimé par l'utilisateur sur un itinéraire, à son estimation de coût qui intervient dans son choix d'itinéraire.

Enfin, nous modélisons deux causes de variations objectives du temps de parcours :

- (i) Les variations en fonction de l'état macroscopique du trafic hors perturbations : i.e. le modèle de congestion.
- (ii) Les variations par perturbation exogène, qui se greffent sur le temps attendu hors perturbation.



Nous négligeons les fluctuations inhérentes aux interactions ponctuelles entre les véhicules dans un flot de trafic.

En fixant l'état macroscopique du trafic, sous la forme des débits par section du réseau, nous modélisons l'effet de perturbations exogènes sur les temps de parcours de manière probabiliste, en explicitant la fréquence d'occurrence des perturbations selon leur ampleur. Autrement dit, nous associons à chaque section une distribution statistique du retard subi en perturbation, distribution dans laquelle une probabilité est associée à chaque valeur éventuelle du retard.

En dépit de notre modèle débit-temps statique, les effets dynamiques d'une période à une autre, c'est-à-dire variations inter-périodes sont modélisées par un variable aléatoire. En fin, supposons que il existe un ensemble  $\Omega$  des circonstances (ou période)  $\omega$ , chacune génère les débits  $x_a(\omega)$  et les temps :

$$T_{a\omega} = \tilde{t}_a(x_{a\omega}) + \zeta_a(\omega) \quad (\text{eq. 6-1})$$

La variable aléatoire modélise  $\zeta_a(\omega)$  modélise la variation éventuelle du temps qui se produit probablement à cause des perturbations exogènes, avec moyenne  $\mu_a = E(\zeta_a)$  et variance  $\sigma_a^2 = V[\zeta_a]$ . Pour simplifier, supposons que les variables aléatoires  $\zeta_a(\omega)$  sont indépendamment distribuées.

Nous avons la formule de temps moyens sur toutes les occurrences :

$$E_\omega[T_{a\omega} : x_{a\omega} = x] = \tilde{t}_a(x) + \mu_a \quad (\text{eq. 6-2})$$

### 6.2.2. La demande

#### Volume et structure de référence

Nous considérons une période de déplacement supposée en régime stationnaire, et une relation origine-destination avec un volume de déplacements noté  $Q$ . Dans cette population de déplacements, nous supposons que tous les usagers ont une même perception du temps tel que connu à chacun d'eux, et un même comportement économique rationnel, de choix individuel d'itinéraire. Ainsi les usagers ne sont différenciés que par leur manière d'estimer le temps, qui résulte de leur statut d'équipement en dispositif d'information.

Le taux d'équipement, noté  $\beta$ , divise le volume total en deux volumes de classe. Par conséquent, le volume de la classe informé et non-informé est respectivement  $q^I = \beta Q$  et  $q^N = (1 - \beta)Q$

## Deux classes d'usagers selon l'équipement

Plusieurs études empiriques ont montré que la connaissance d'un automobiliste est déterminée de manière très complexe par plusieurs facteurs dont deux facteurs primordiaux sont l'effort cognitif et la disponibilité de l'information routière. En négligeant le facteur de l'effort cognitif par une considération en moyen de cet aspect, nous supposons que la perception d'un usager-automobiliste ne dépend que du service d'information dont il dispose. Dans la littérature scientifique (Al-Deek, Khattak *et al.*, 1998), (Maher et Hughes, 1995), (Ramming, 2002), on rencontre diverses segmentations selon des types d'information : information dynamique, information statique, information descriptive, information prédictive, information sur la topologie, information sur le coût, etc.

Nous analysons les déplacements d'une relation origine-destination, par exemple du nœud O vers le nœud D. La population des voyageurs se déplaçant du nœud O au nœud D appartiennent à une de deux classes d'usagers selon leur statue d'équipement: la classe *I* des usagers équipés, puis parfaitement informés en information dynamique ou la classe *N* des usagers non-équipés, puis non-informés dynamiquement- ils ne connaissent que les conditions moyennes associées à l'état macroscopique de trafic

Les quantités d'usagers de deux classes sont définies par le taux d'équipement  $\beta$ , la proportion des usagers équipés parmi l'ensemble des usagers, et le volume total de demande  $Q$ . Le taux d'équipement  $\beta$  dose la diffusion de l'information dans la population.

## Comportement des usagers

Nous supposons que tous les usagers choisissent leur itinéraire lors de leur déplacement de l'origine vers la destination de la même manière de raisonnement : minimiser leur coût individuel. Tout fois, la décision de chaque usager dépend également de la connaissance sur les conditions du trafic dont il dispose.

L'usager informé est supposé de connaître parfaitement les conditions de trafic quelque soit la circonstance :

$$t'_a(\omega) = T_a(\omega) \quad (\text{eq. 6-3})$$

Pendant que l'usager non-équipé est supposé de connaître une connaissance grossière sur les conditions du trafic, c'est-à-dire les valeurs moyennes des temps.

$$t_a^N = E_{\omega}[T_a(\omega)]. \quad (\text{eq. 6-4})$$

Pour l'instant, le coût à l'utilisateur est limité au temps de déplacement, en négligeant les péages, le confort ou d'autres critères de qualité. Nous focalisons sur les perturbations qui font de notre principale préoccupation.

Pour l'arc  $a$ , et la classe d'utilisateurs  $u \in \{I, N\}$  à l'occurrence  $\omega$ , notons  $x_a^u(\omega)$  le débit sur l'arc, il détient que :

$$\begin{aligned} x_a(\omega) &= x_a^I(\omega) + x_a^N(\omega) \\ x_1^I(\omega) + x_2^I(\omega) &= q^I \\ x_1^N(\omega) + x_2^N(\omega) &= q^N \end{aligned} \quad (\text{eq. 6-5})$$

Notons que les usagers non-informés ne font que leur choix à long terme et les débits non-informés ne dépendent pas de  $\omega$  :

$$\forall \omega: x_a^N(\omega) = \bar{x}_a^N$$

### 6.2.3. L'équilibre offre-demande bi-niveau

Enchainons les hypothèses concernant l'offre et demande dans les explications suivantes :

- A chaque occurrence  $\omega$ , chaque usager choisit son itinéraire : son déplacement sur cette route induit un débit supplémentaire.
- En considérant la population des voyageurs, leurs choix individuels induisent les débits sur le réseau.
- Le débit sur un chaque arc détermine son temps selon la fonction de congestion (fonction débit-temps).
- A son tour, les temps sur les deux arcs conditionnent le choix individuel des usagers.

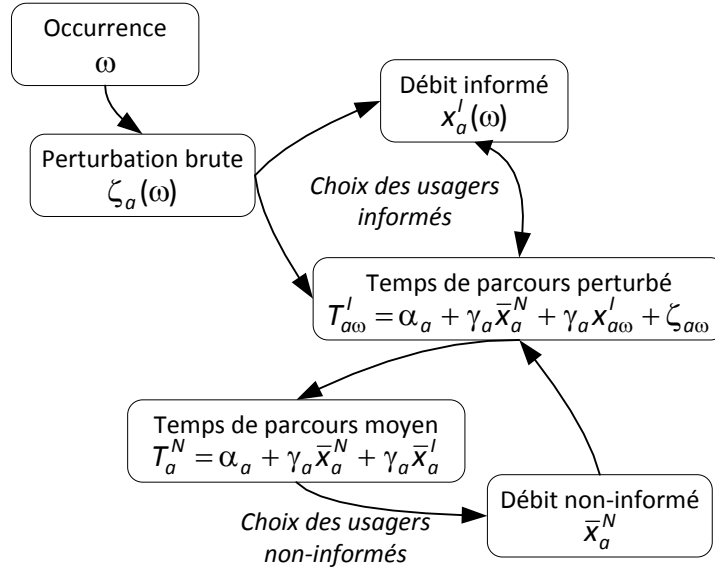


Fig. 6–4 : Dépendances logiques entre les hypothèses

Il existe un cycle d'enchaînement des interactions entre l'offre et la demande. La fig. Fig. 6–4 fournit une illustration sur les dépendances entre les notions dans notre modèle en précisant le comportement spécifique de chaque classe en fonction de son accès à l'information dynamique.

D'abord une circonstance  $\omega$  induit des perturbations brutes  $\zeta_a(\omega)$  sur les temps des arcs. Puis les usagers informés adaptent leur itinéraire en fonction de la perturbation et du mécanisme de congestion ; cela produit une affectation  $x_a^I(\omega)$ . Puis, l'affectation des usagers informés  $I$  aux arcs  $a$  s'opère selon une alternative :

- exclusivement sur l'arc  $a$  si  $t_a(\omega) < t_{3-a}(\omega)$ , avec alors  $x_a^I(\omega) = q^I = \beta Q$  et  $x_{3-a}^I(\omega) = 0$ .
- entre les deux arcs si  $t_1(\omega) = t_2(\omega)$ .

Pour trancher l'alternative, il faut déterminer si l'effet de congestion jouant sur un volume  $q^I = \beta Q$ , est susceptible de compenser la perturbation brute : pour cela il faut et il suffit que, en notant  $\alpha_a^I = \alpha_a + \gamma_a \bar{X}_a^N$ ,

$$-\gamma_2 q^I \leq \alpha_2^I - \alpha_1^I + \xi_2(\omega) - \xi_1(\omega) \leq \gamma_1 q^I \quad (\text{eq. 6-6})$$

A ce stade chaque temps  $t_a(\omega)$  est bien établi et connu : le temps moyen  $\bar{t}_a = E_\omega[t_a(\omega)]$  synthétise l'ensemble des circonstances, et il induit le choix d'itinéraire pour les usagers  $N$  non équipés ; et donc les volumes  $\bar{X}_a^N$ . Enfin  $\bar{X}_a^N$  rétroagit sur les temps via la fonction de congestion.

Il s'agit d'un modèle d'équilibre du trafic à bi-niveau : instant et long terme. Chaque niveau pose des contraintes à l'autre. Notre modèle ne doit pas être confondu à un modèle à deux classes dans lequel il y a une classe déterministe et une classe Probit (Van Vuren et Watling, 1991) et (Maher et Hughes, 1995)

### 6.3.ANALYSE D'EQUILIBRE DU TRAFIC

Nous supposons provisoirement que les  $\bar{x}_a^N$  sont fixés. Nous en déduisons successivement l'affectation de  $q^I$  aux  $x_a^I(\omega)$  en fonction de  $\omega$  (§6.3.1), puis la moyenne d'un débit informé  $\bar{x}_a^I$  (§6.3.2), et ensuite la rétroaction sur les  $\bar{x}_a^N$  (§6.3.3). En fin, nous caractérisons le problème de point-fixe (§6.3.4) et proposons les indicateurs d'utilité pour l'individu et pour le trafic (§6.3.5).

#### 6.3.1.Affectation instantanée des usagers informés

En notant  $\alpha_a^I = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^N$ ,  $T_{a\omega} = \alpha_a^I + \gamma_a x_a^I(\omega) + \zeta_{a\omega}$  est le temps de l'arc  $a$  à l'occurrence  $\omega$ . S'il y avait qu'un usager informé, il choisirait l'itinéraire de minimum  $T_{a\omega}(0) = \alpha_a^I + \zeta_{a\omega}$ . Cependant, la réaffectation dynamique des usagers informés va tenter d'augmenter le temps de cette route due à sa fonction de congestion : cet effet peut résulter une compensation partielle, c'est-à-dire  $T_{a\omega}$  reste encore moins que  $T_{b\omega}$  ou une compensation totale, c'est-à-dire l'égalité des temps :

$$\alpha_a^I + \gamma_a x_a^I(\omega) + \zeta_{a\omega} = \alpha_b^I + \gamma_b x_b^I(\omega) + \zeta_{b\omega} \quad (\text{eq. 6-7})$$

Dans le dernier cas,  $x_a^I(\omega) + x_b^I(\omega) = q^I$  conduit à :

$$x_a^I(\omega) = \frac{\gamma_b q^I + \alpha_b^I + \zeta_b - \alpha_a^I - \zeta_a}{\gamma_a + \gamma_b} \quad (\text{eq. 6-8})$$

, et: 
$$T_{a\omega} = \frac{\gamma_a \gamma_b q^I + \gamma_a \alpha_b^I + \gamma_b \alpha_a^I}{\gamma_a + \gamma_b} + \frac{\gamma_b \zeta_a + \gamma_a \zeta_b}{\gamma_a + \gamma_b} \quad (\text{eq. 6-9})$$

Dans le cas précédent, nous avons  $x_{a\omega}^I = q^I$  et  $x_{b\omega}^I = 0$ , puis  $T_{a\omega} = \alpha_a^I + \gamma_a q^I + \zeta_{a\omega}$  et  $T_{b\omega} = \alpha_b^I + \zeta_{b\omega}$ , avec  $T_{a\omega} \leq T_{b\omega}$ . Cette condition est équivalente à :  $\zeta_{b\omega} - \zeta_{a\omega} \geq \alpha_a^I - \alpha_b^I + \gamma_a q^I$

### 6.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne des usagers informés

Pour calculer les débits par arc moyens des usagers informés, les  $\bar{x}_a^I$ , nous déconditionnons par rapport aux perturbations  $\zeta_1, \zeta_2$  tout en restant conditionnels aux  $\bar{x}_a^N$ .

Notant  $B \equiv \alpha_1^I - \alpha_2^I + \gamma_1 q^I$  et  $A \equiv \alpha_1^I - \alpha_2^I - \gamma_2 q^I$  : conditionnellement à  $z = \zeta_2 - \zeta_1$ , nous avons :

- si  $z > B$  puis  $T_{1\omega}(q^I) \leq T_{2\omega}(0)$  alors  $x_1^I(\omega) = q^I$  et  $x_2^I(\omega) = 0$ ,
- si  $z < A$  puis  $T_{1\omega}(0) \geq T_{2\omega}(q^I)$  alors  $x_1^I(\omega) = 0$  et  $x_2^I(\omega) = q^I$ ,
- si  $z \in [A, B]$  puis  $T_{1\omega} = T_{2\omega}$  aux débits  $x_1^I(\omega) = \frac{z - A}{\gamma_1 + \gamma_2}$  et  $x_2^I(\omega) = \frac{B - z}{\gamma_1 + \gamma_2}$

En notant  $F$  la fonction de distribution de  $Z = \zeta_2 - \zeta_1$  sur l'ensemble  $\Omega$  des cas  $\omega$  et  $\tilde{F}$  sa fonction moment tronqué  $\tilde{F}(x) = \int^x z dF(z)$ , par agrégations, nous avons :

$$\bar{x}_1^I = 0 \cdot \int_{-\infty}^A dF(z) + \int_A^B \frac{z - A}{\gamma_1 + \gamma_2} dF(z) + q^I \cdot \int_B^{+\infty} dF(z) = q^I - \bar{x}_2^I \quad (\text{eq. 6-10})$$

, dans laquelle :

$$\bar{x}_2^I = \frac{G(B) - G(A)}{\gamma_1 + \gamma_2} \text{ dont } G(x) \equiv xF(x) - \tilde{F}(x) \quad (\text{eq. 6-11})$$

L'indépendance de  $\zeta_1$  et  $\zeta_2$  entraîne le fait que  $Z$  est une variable aléatoire de moyenne  $\mu = \mu_2 - \mu_1$  et variance  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$

### 6.3.3. Affectation des usagers non-informés

Il reste à affecter les usagers  $N$  entre les deux arcs. Nous supposons que faute d'accès à l'information dynamique, un usager  $N$  perçoit uniquement les temps moyens des itinéraires, et choisit un itinéraire de temps moyen minimal. Reste à préciser de quel temps moyen s'agit-il, et la réponse à cette question dépendrait de l'exposition particulière de chaque usager  $N$ . Nous supposons que les usagers  $N$  sont tous exposés à l'ensemble des perturbations, et qu'ils subissent les temps moyens induits par les trafics et la congestion, les perturbations et leur amortissement par les usagers informés.

Notant  $\alpha_a^N \equiv \alpha_a + \mu_a + \gamma_a \bar{x}_a^I$  et comparant  $\alpha_1^N$  avec  $\alpha_2^N$  :

- si  $\alpha_1^N \geq \alpha_2^N + \gamma_2 q^N$  alors  $\bar{x}_2^N = q^N$  et  $\bar{x}_1^N = 0$ .
- si  $\alpha_1^N + \gamma_1 q^N \leq \alpha_2^N$  alors  $\bar{x}_1^N = q^N$  et  $\bar{x}_2^N = 0$ .
- si  $-\gamma_1 q^N \leq \alpha_2^N - \alpha_1^N \leq \gamma_2 q^N$  alors  $\bar{x}_a^N = \frac{\alpha_b^N - \alpha_a^N + \gamma_b q^N}{\gamma_a + \gamma_b}$ .

La dernière condition se déduit de  $\bar{t}_a = \bar{t}_b = \theta$  avec  $\bar{t}_a = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^I + \gamma_a \bar{x}_a^N + \mu_a$ , lorsque l'affectation des usagers non-informés sur les itinéraires les moins coûteux subis de la congestion entraîne un équilibre du trafic avec un équilibre de temps  $\theta$ .

#### 6.3.4. Caractérisation du problème de point-fixe

En enchaînant l'ensemble des formules précédentes, nous obtenons que les débits non-informés ( $\bar{x}_a^N$ ) induit les temps de référence d'usagers informés ( $\alpha_a^I$ ), qui, à son tour, déterminent les débits informés moyens ( $\bar{x}_a^I$ ), qui en suite détermine les temps de référence d'usagers non-informés ( $\alpha_a^N$ ), qui enfin déterminent les débits non-informés ( $\bar{x}_a^N$ ). Ce cycle indique que chaque variable parmi ( $\bar{x}_a^N$ ), ( $\bar{x}_a^I$ ), ( $\alpha_a^I$ ), ( $\alpha_a^N$ ) résout a spécifique problème de point-fixe. Pour le cas d'école de deux routes que nous traitons, ce problème est facile à résoudre car il implique à seulement une inconnue : un algorithme de relaxation serait approprié, pour l'instance un algorithme de combinaison convexe aux débits non-informés. Dans la section suivante, une solution analytique est fournie sous certaines hypothèses statistiques des variables aléatoires.

#### 6.3.5. Indicateurs d'utilité

Nous mesurons les effets de l'information dynamique sur le trafic par les trois indicateurs suivants :

Pour un usager non-informé de la classe  $N$ , le coût moyen est suivant :

$$\bar{C}^N = \bar{t}_1^N \frac{x_1^N}{q^N} + \bar{t}_2^N \frac{x_2^N}{q^N} \quad (\text{eq. 6-12})$$

Pour un usager informé de la classe  $I$ , le coût moyen est calculé par l'agrégation des coûts à toutes les occurrences :

$$\bar{C}^I = E_\omega[\min\{c_1(\omega), c_2(\omega)\}] = \int_z \min\{\bar{c}_{1/z}^I, \bar{c}_{2/z}^I\} dF(z) \quad (\text{eq. 6-13})$$

Dans laquelle  $\bar{c}_{a/z}^I \equiv E_\omega[\alpha_a^I + \zeta_a(\omega) + \gamma_a x_a^I(\omega) \mid (\zeta_2 - \zeta_1)(\omega) = z]$  désigne le coût moyen de la route  $a$  à un usager informé, conditionnel à  $\zeta_2 - \zeta_1 = z$

En accord avec la comparaison de  $\bar{c}'_{1/z}$  à  $\bar{c}'_{2/z}$ , le coût minimal est donné par une des deux routes selon trois cas suivants :

- $\bar{c}'_{2/z} = \alpha'_2 + E[\zeta_2(\omega)/\Delta\zeta = z] + \gamma_2 q'$  if  $z \in ]-\infty, A]$  alors route 2 est optimale
- $\bar{c}'_{1/z} = \alpha'_1 + E[\zeta_1(\omega)/\Delta\zeta = z] + \gamma_1 q'$  if  $z \in ]B, +\infty]$  alors route 1 est optimale
- $\bar{c}'_{1/z} = \alpha'_1 + E[\zeta_1(\omega)/\Delta\zeta = z] + \gamma_1 \frac{z-A}{\gamma_1 + \gamma_2}$  if  $z \in ]A, B]$  alors les deux routes sont optimales.

Regroupant les trois cas, nous avons :

$$\begin{aligned} \bar{C}' = & \alpha'_1 + \gamma_1 q' - \frac{\gamma_2 A.F(A) + \gamma_1 B.F(B)}{\gamma_1 + \gamma_2} + \frac{\gamma_1 [\tilde{F}(B) - \tilde{F}(A)]}{\gamma_1 + \gamma_2} \\ & + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF(z) + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF(z) \end{aligned} \quad (\text{eq. 6-14})$$

Comme  $\int_{-\infty}^x \bar{\zeta}_{2/z} dF(z) + \int_x^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF(z) = \tilde{F}(x) + \mu_1$ , nous obtenons une formule plus simple :

$$\bar{C}' = \bar{t}_1 - G(A) \quad (\text{eq. 6-15})$$

Pour l'ensemble du trafic, le coût moyen par usager est calculé en effectuant la moyenne pondérée des coûts de deux classes :

$$\bar{C} = \beta \bar{C}' + (1 - \beta) \bar{C}^N = \bar{C}^N - \beta \Gamma^N \quad (\text{eq. 6-16})$$

Pour un usager du réseau, l'utilité (par déplacement) d'être équipé en information dynamique est équivalente à :

$$\Gamma^N = \bar{C}^N - \bar{C}' \quad (\text{eq. 6-17})$$

Les indicateurs à un taux d'équipement  $\beta$  devront être comparés à une situation de référence, disons la situation sans information :  $\beta = \beta_0 = 0$

#### 6.4. ANALYSE PARAMETRIQUE ET NUMERIQUE

Dans notre application à un cas d'école, deux formules analytiques sont fondamentales : d'abord, celle des débits moyens des usagers informés (eq.) et deuxièmement, celle du coût moyen pour un usager informé (eq.). Toutes les



deux impliquent la fonction  $G$ , dont les propriétés de base nous permettent d'effectuer l'analyse de sensibilité du modèle de manière analytique et paramétrique. En outre, les hypothèses supplémentaires sur la distribution statique des perturbations aléatoires rendent des renseignements considérables concernant l'influence du taux d'équipement, du volume de demande, de l'ampleur des congestions accidentelles et de la sensibilité à la congestion.

#### 6.4.1. Propriété de l'écart des perturbations

L'écart des perturbations,  $Z \equiv \Delta\zeta = \zeta_2 - \zeta_1$ , a la fonction CDF  $F$  et la fonction de moment tronqué  $\tilde{F}(x) = \int^x z dF(z)$  et une fonction liée  $G(x) \equiv xF(x) - \tilde{F}(x)$ . Par sa définition,

$$G(x) = \int^x (x - z) dF(z) \quad (\text{eq. 6-18})$$

Donc elle est une fonction non-négative (car  $(x - z) \geq 0$  et  $dF(z) \geq 0$ ) et croissante.

Des spécifications supplémentaires sur les perturbations aléatoires sont nécessaires pour tracer l'influence de leurs paramètres principaux, c'est-à-dire valeur moyenne et l'écart-type. Nous allons considérer les distributions Gaussienne et Bernoulli-Exponentielle des variables aléatoires.

##### Cas Gaussien

Supposons que  $\zeta_a \approx N(\mu_a, \sigma_a^2)$  et que le couple  $(\zeta_a, \zeta_b)$  font un vecteur Gaussien, donc l'écart  $Z \equiv \Delta\zeta = \zeta_2 - \zeta_1 \approx N(\mu, \sigma^2)$  avec  $\mu = \mu_2 - \mu_1$  et  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\text{cov}(\zeta_a, \zeta_b)$  a aussi une distribution Gaussienne. La variance est réduite à  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$  si les perturbations locales sont indépendantes. La variable Gaussienne  $Z$  a :

- La fonction de densité de probabilité  $f(x) = \exp[-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2] / (\sigma\sqrt{2\pi})$  dont  $\phi(t)$  est fonction de densité de probabilité d'une variable Gaussienne centrée réduite (avec moyenne 0 et variance 1).
- La fonction de distribution accumulée  $F(x) = \Pr\{z \leq x\} = \Phi(\frac{x-\mu}{\sigma})$  dont  $\Phi(t) = \int_{-\infty}^t \phi(u) du$  est la fonction de distribution accumulée variable Gaussienne centrée réduite.

- La fonction de moment tronqué  $\tilde{F}(x) = \mu \cdot \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) - \sigma \cdot \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$ , réduite à  $\tilde{F}(x) = -\sigma \cdot \phi(x/\sigma)$  pour le cas  $\mu = 0$ .

Cela nous permet de dériver la moyenne des minimums des deux variables Gaussienne :

$$\begin{aligned} E[\min\{c_1(\omega), c_2(\omega)\}] &= \bar{c}_1 + \tilde{F}(0) \\ &= \bar{c}_1 \cdot \Phi\left(\frac{\bar{c}_2 - \bar{c}_1}{\sigma}\right) + \bar{c}_2 \cdot \Phi\left(\frac{\bar{c}_1 - \bar{c}_2}{\sigma}\right) - \sigma \cdot \phi\left(\frac{\bar{c}_1 - \bar{c}_2}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

En fin, définissons la fonction  $g_N(x) = \phi(x) + x\Phi(x)$  qui est une fonction positive, croissante, illustrée par la Fig. 6–6

### Cas Bernoulli-Exponentiel

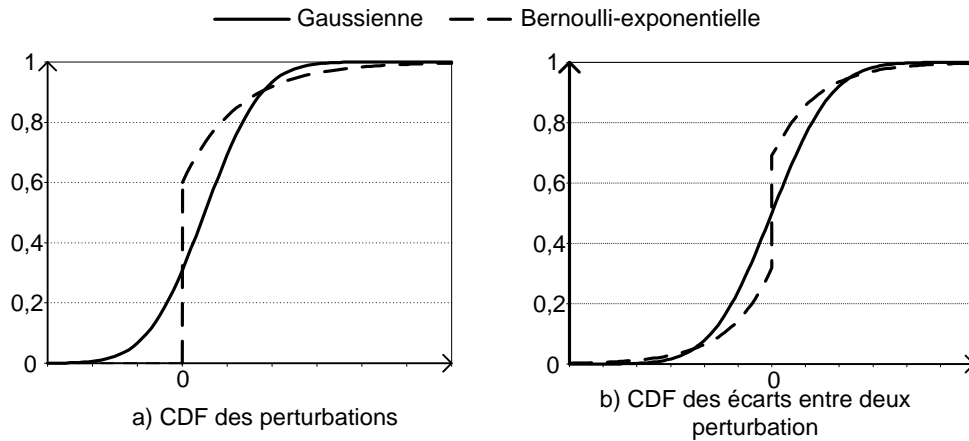
Nous supposons que  $\zeta_a$  est nulle à probabilité  $1 - \eta_a$  et positif à probabilité  $\eta_a$ , qui fait l'hypothèse Bernoullienne. La partie positive est distribuée exponentielle avec paramètre  $\lambda_a$ . Puis  $E[\zeta_a] = \eta_a / \lambda_a$  et  $V[\zeta_a] = \eta_a(2 - \eta_a) / \lambda_a^2$ .

L'écart des perturbations Z a :

- La valeur moyenne  $(\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1})$ ,
- La variance  $\frac{\eta_1(2 - \eta_1)}{\lambda_1^2} + \frac{\eta_2(2 - \eta_2)}{\lambda_2^2}$ ,
- La fonction de distribution accumulée
- $F(x) = 1_{\{x < 0\}} (\eta_1 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) \exp(\lambda_1 x) + 1_{\{x \geq 0\}} [1 - (\eta_2 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) \exp(-\lambda_2 x)]$ ,
- La fonction de moment tronqué :

$$\begin{aligned} \tilde{F}(x) &= 1_{\{x < 0\}} (\eta_1 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) (x - \frac{1}{\lambda_1}) \exp(\lambda_1 x) + 1_{\{x \geq 0\}} [(\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1}) - (\eta_2 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) (x + \frac{1}{\lambda_2}) \exp(-\lambda_2 x)] \text{ et} \\ G(x) &= 1_{\{x < 0\}} (\eta_1 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) \exp(\lambda_1 x) + 1_{\{x \geq 0\}} [(\eta_2 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) \exp(-\lambda_2 x) + x - (\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1})] \end{aligned}$$

Le cas Bernoulli-Exponentiel donne une représentation plus réaliste des perturbations aléatoires de temps (de parcours) : les perturbations non-nulles se paraissent à une proportion (probabilité) limitée, et elles prennent des valeurs positives plus fréquemment que des valeurs négatives dont l'ampleur devrait être restreinte.



**Fig. 6-5 : Distribution des perturbations selon l'hypothèse (à gauche) et de l'écart entre les deux perturbations (à droite)**

Pour faciliter la comparaison au cas Gaussien, nous supposons en supplément que  $\eta_a = \eta$  et  $\lambda_a = \lambda$  qui entraîne à un écart Z symétrique. Puis la fonction G est réduite à :

$$G(x) = \frac{\eta}{\lambda} \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) \exp(-\lambda|x|) + (x)^+,$$

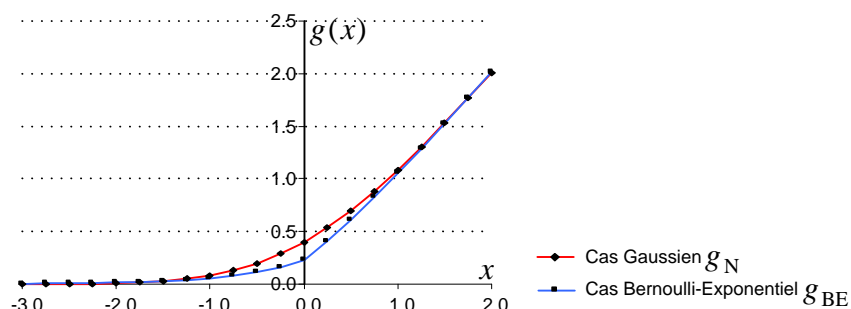
qui est liée à une sorte de fonction normalisée :  $g_{BE}$

$$g_{BE}(x) = \frac{\eta}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) \exp(-\sqrt{2}|x|) + (x)^+,$$

de manière suivante:

$$G(x) = \frac{\sqrt{2}}{\lambda} g_{BE}\left(\frac{\lambda}{\sqrt{2}} x\right) \quad (\text{eq. 6-19})$$

Par conséquence,  $g_{BE}$  est normalisée par rapport à  $\lambda$ , puis à l'écart-type  $\sigma_a = 1/\lambda_a$  d'une perturbation car il est positif. Notons  $\sqrt{2}/\lambda$  par  $\sigma$  dans ce cas.



**Fig. 6-6 : Fonction pour mesurer le gain de l'information**

#### 6.4.2. Analyse paramétrique du gain de l'information par rapport à la variabilité des perturbations

Au cas d'inégalité des temps moyens (coûts moyens), par exemple  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$ , rappelons de (eq. 6-17) que le gain de l'information est :

$$\Gamma^N = G(A) \quad (\text{eq. 6-20})$$

, dans lequel:  $A \equiv \alpha_1 + \gamma_1 x_1^N - \alpha_2 - \gamma_2 x_2^N - \gamma_2 q' = \bar{t}_1 - \bar{t}_2 - (\gamma_1 + \gamma_2) \bar{x}_1'$

Comme G est une fonction non-négative et croissante, plus la différence des temps moyens est importante, plus le gain de l'information est élevé. Une sensibilité à la congestion plus élevée (par exemple,  $\gamma_a$ ) réduit le gain de l'information.

A chacun des deux cas, sachant que  $G(x) = \sigma g(x/\sigma)$ , par la négativité de A (car  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$  et  $\bar{x}_1' \geq 0$ ), il semble que une augmentation de la variabilité des perturbations aléatoires, c'est-à-dire une augmentation de la congestion accidentelle, entraîne un gain de l'information plus important : une  $\sigma$  plus élevé réduit  $A/\sigma$ , puis il augmente  $g(A/\sigma)$  ; comme la fonction est positive,  $\sigma g(A/\sigma)$  augmente également.

#### 6.4.3. Cas d'égalité des temps moyens

L'équation caractérisant  $\bar{x}_2'$  est équivalent à  $B = \bar{t}_1 - \bar{t}_2 + \mu + G(B) - G(A)$ . Sous égaux temps moyens et Z centré, cela se réduit à  $B = \mu + G(B) - G(A)$ . Si Z est symétrique, nous avons :

$$B = -A = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \beta Q.$$

$$\text{Puis} \quad \bar{x}_2' = \bar{x}_1' = \frac{1}{2} q' = \frac{1}{2} \beta Q \quad (\text{eq. 6-21})$$

$$\bar{C}' = \bar{t}_1 - \sigma \cdot g\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2\sigma} \beta Q\right) \quad (\text{eq. 6-22})$$

$$\bar{C}^N = \bar{t}_1 = \frac{Q\gamma_1\gamma_2 + \alpha_1\gamma_2 + \alpha_2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad (\text{eq. 6-23})$$

Le gain de l'information donc :

$$\Gamma^M = \sigma \cdot g\left(-\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \frac{\beta Q}{\sigma}\right) \quad (\text{eq. 6-24})$$

L'utilité individuelle d'être équipé accroît avec  $\sigma$ , autrement dit avec l'ampleur des perturbations. Elle décroît avec  $q' = \beta Q$ , puis avec le volume de demande  $Q$  et le taux d'équipement  $\beta$ . Elle décroît aussi avec  $\gamma_1 + \gamma_2$  qui mesure la sensibilité du temps au débit – c'est-à-dire la sensibilité à la congestion.

Sous l'inégalité des temps  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$ , puis  $x'_1 \geq q'/2$ , le gain  $\Gamma^M$  d'être équipé est moins que dans le cas d'égalité des temps.

#### 6.4.4. Sensibilité du gain de l'information au taux d'équipement

A un volume de demande  $Q$  donné, le gain privé de l'information décroît avec le taux d'équipement  $\beta$  quand les temps moyens sont égaux sur les deux arcs. Cela est due au fait que plus les usagers sont équipés, plus compensation est induite entre les deux arcs, qui bénéficie les usagers non-informés. Ce processus d'égalisation est appliqué à chaque  $z \in [A, B]$ , avec  $B - A = q'(\gamma_1 + \gamma_2) = (\gamma_1 + \gamma_2)\beta Q$  : une augmentation de  $\beta$  peut entraîner un intervalle  $[A, B]$  plus large.

Définissons la condition de saturation à un niveau de confiance  $1 - \varepsilon$ , auquel au moins une proportion de  $1 - \varepsilon$  occurrences  $\omega$  est couvertes par l'intervalle  $[A, B]$  : cela est satisfait sous la condition :

$$\beta \geq \frac{2u_{\varepsilon/2}\sigma}{(\gamma_1 + \gamma_2) \cdot Q} \equiv \tilde{\beta}_\varepsilon \quad (\text{eq. 6-25})$$

dans laquelle  $u_{\varepsilon/2}$  note la fractile au niveau de probabilité  $1 - \varepsilon/2$  de  $Z$

- $\tilde{t}_1(x_1) = 40 + 2x_1$  et  $\sigma_1 = 0.3\tilde{t}_1$ .
- $\tilde{t}_2(x_2) = 80 + x_2$  et  $\sigma_2 = 0.3\tilde{t}_2$ .

Deux cas de figure sont choisis pour les simulations numériques : faible volume de demande  $Q=10$  et haut volume de demande  $Q=100$

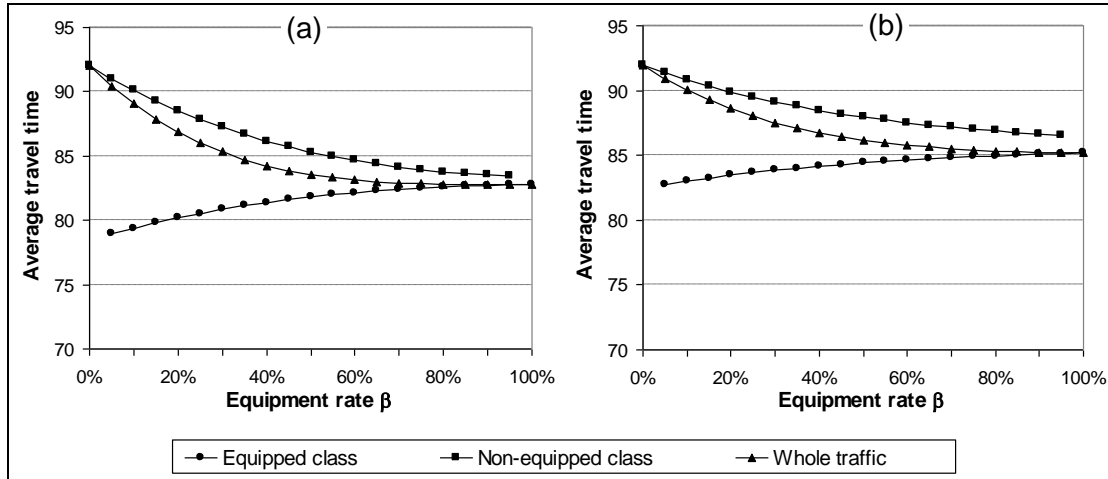


Fig. 6-7 : Coûts moyens à  $Q=20$ : (a) Cas Gaussien; (b) Cas Bernoulli-Exponentiel

La Fig. 6-7 établie à faible volume de demande  $Q=20$  montre que  $\bar{C}^I$  ainsi  $\bar{C}$  décroît avec  $\beta$  mais l'écart entre  $\bar{C}^N$  et  $\bar{C}^I$  (autrement dit  $\Gamma^N$ ) décroît aussi vers 0.

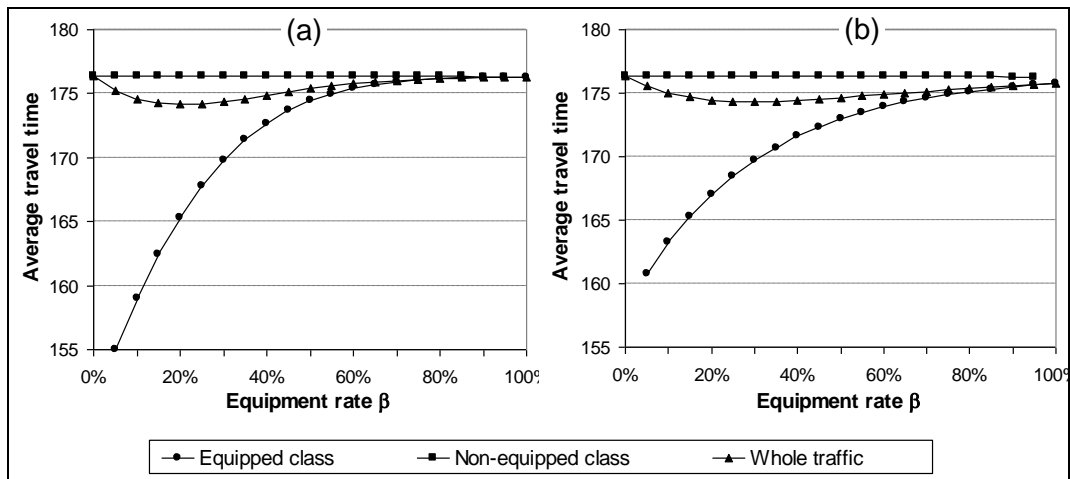


Fig. 6-8 : Coûts moyens à  $Q=130$ : (a) Cas Gaussien; (b) Cas Bernoulli-Exponentiel

La Fig. 6-8 établie à un volume de demande élevé  $Q=130$  dépeint les mêmes effets mais d'une manière plus modérée :  $\bar{C}$  atteint son minimum à une valeur relativement faible de  $\beta$  tandis que  $\bar{C}^N$  est presque constante.

En outre, les deux hypothèses de perturbation aléatoire (Gaussienne et Bernoulli-Exponentielle) donne presque les mêmes renseignements, même si les effets de saturation sont plus forts que dans le cas Gaussien.

En général, l'information dynamique entraîne des effets positifs aux usagers informés et à l'ensemble du trafic, puis pas d'effet négatif aux usagers non-informés. Cependant, le bénéfice à l'ensemble du trafic atteint son maximum à un taux d'équipement assez faible puis peut diminuer si le taux d'équipement continue à s'accroître

#### 6.4.5. Sensibilité du gain de l'information au volume de demande

Déterminons le domaine d'égalité des temps moyens en fonction des paramètres  $Q$  et  $\beta$  : en supposant que  $\alpha_1 \leq \alpha_2$ , si  $Q < Q_0^* \equiv (\alpha_2 - \alpha_1)/\gamma_1$ , indépendamment de la valeur de  $\beta$  les temps moyens ne sont pas égaux avec  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$ , donc l'affectation de tous les usagers sur la route de moindre de temps ne peut pas rendre compétitif à l'autre route en temps moyens. Si  $Q > Q_0^*$ , puis l'hypothèse d'égalité des temps peut induire l'égalité des débits informés sur les deux arcs, impliquant que la proportion  $\pi$  des usagers non-informés sur la route 2 doit satisfaire :

$$\pi = \frac{1}{2} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)Q}{(\gamma_1 + \gamma_2)(1-r)Q} \equiv \hat{\pi} \quad (21)$$

Pour un  $\hat{\pi}$  dans l'intervalle  $[0, 1]$ ,  $\beta$  doit être dans un intervalle qui dépend de  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$ , puis :

- Si  $\beta \leq 2\min\{\gamma_1, \gamma_2\}/(\gamma_1 + \gamma_2)$  l'égalité des temps s'établit si  $Q \geq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\gamma_1 - \beta(\gamma_1 + \gamma_2)/2} \equiv Q_\beta^*$ ; au dessous de ce seuil, tous  $q^N$  sont affectés à la route de coût minimal.
- $2\gamma_2 \leq \beta(\gamma_1 + \gamma_2) \leq 2\gamma_1$  l'égalité s'établit si  $\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta} \leq Q \leq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta - \gamma_2}$ . Au dessous de cette borne inférieure  $q^N$  sont affectés sur la seule route de coût minimal, si non  $q^N$  sont affectés sur les deux routes.
- Si  $\beta > 2\gamma_1/(\gamma_1 + \gamma_2)$ , l'égalité ne peut pas s'établir.

Les trois cas se produisent si  $\gamma_2 \leq \gamma_1$ , sinon, si  $\gamma_2 > \gamma_1$  le second cas ne se produit pas.

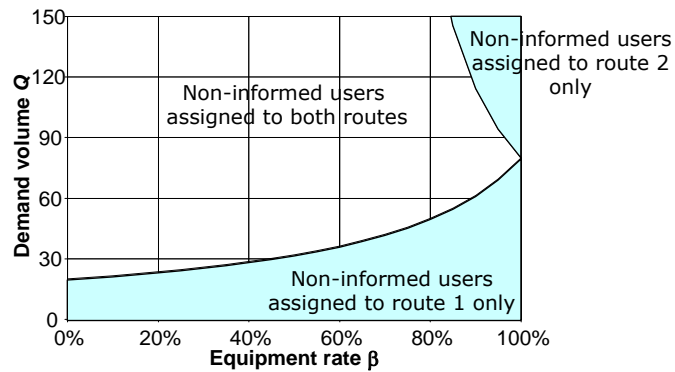


Fig. 6–9 : Domaines d'égalité et d'inégalité des temps moyens en fonction de  $\beta$  and  $Q$

## 6.5. DISCUSSIONS

### 6.5.1. Sur le modèle à la Maher et Hughes (1995)

(Maher et Hughes, 1995) a modélisé les effets de la diffusion de l'information parmi une population des usagers-décideurs-automobilistes dans une modélisation de deux classes d'utilisateur qui sont supposées respectivement informée et non-informée : les usagers informés sont supposés de percevoir le temps moyen pendant que les usagers non-informés sont supposés de percevoir le temps perturbé ; les perturbations sont donc subjectives et due à une erreur de connaissance et de perception. Les auteurs ont modélisé l'affectation du trafic par un problème d'équilibre offre-demande avec deux classes d'utilisateurs respectivement informée et non-informée : les usagers informés ont un comportement déterministe, dénoté  $D$  et les usagers non-informés ont un comportement stochastique, dénoté  $S$ . L'application du modèle à la (Maher et Hughes, 1995) engendre le jeu de conditions suivant :

- $x_a = x_a^D + x_a^S$  et  $\bar{t}_a = \tilde{t}_a(x_a)$ .
- Pour la classe non-informée  $S$ , le temps perçu pour l'arc  $a$  est :  $t_a = \bar{t}_a + \zeta_{a\omega}$  et la probabilité de choix de la route 2 est  $p_2^S \equiv \Pr\{t_2 \leq t_1 | S\} = \Pr\{\zeta_2 - \zeta_1 \leq \bar{t}_1 - \bar{t}_2\} = \Phi\left(\frac{\bar{t}_1 - \bar{t}_2}{\sigma}\right)$  puis  $x_2^S = p_2^S q^S$  et  $x_1^S = (1 - p_2^S) q^S$ .
- La classe informée  $D$  est affecté à la route la plus courte en temps de parcours moyen, puis  $q^D = x_1^D + x_2^D$ ,  $x_a^D \geq 0$  et  $x_a^D (\bar{t}_a - \min\{\bar{t}_1, \bar{t}_2\}) = 0$ .

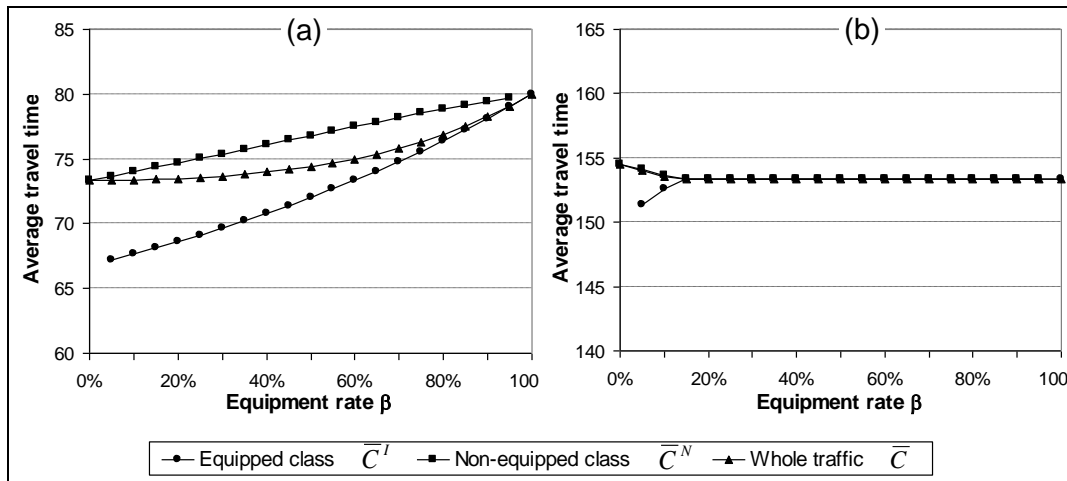


Fig. 6-10 : Coût moyens donnés par le modèle à la Maher et Hughes à  $Q=20$  (a) et  $Q=130$  (b)

Le jeu de conditions ci-dessus se réduit à une équation de  $x_2^S$  qui est facile à résoudre de manière numérique avec les mêmes paramètres qu'en section §6.4 donne la Fig. 6-10 .



A  $Q=20$ , les temps moyens ne sont pas égaux et la diffusion de l'information fait augmenter le temps moyen. Cela est contre-intuitif et erroné.

A  $Q=130$ , les temps moyens sont égaux et la diffusion de l'information donne certains effets mais pas de manière significative.

### 6.5.2. Sur modèle amélioré avec un traitement grossier

L'interprétation de l'information dynamique proposée par (Maher et Hughes, 1995) est déficiente en ce que, selon eux, l'information dynamique permettrait à son usager de percevoir un temps déterministe non-perturbé pendant que l'usager non-informé percevrait le temps perturbé. En fait, l'information dynamique appartient à l'état du trafic en temps réel et aux perturbations auxquelles les usagers sont confrontés. Chaque usager équipé est informé des conditions réelles de son déplacement. Ainsi, une correction au modèle à la Maher et Hughes est évidemment de changer des indices  $S$  et  $D$  dans les conditions liées à leurs classes d'usager : cela permet d'obtenir un modèle d'affectation corrigé avec deux classes d'usagers, à savoir les usagers équipés notés  $S$  qui sont informés des perturbations et les prendre en compte dans leur choix d'itinéraire – conformément à un modèle d'affectation stochastique, et les usagers non-équipés notés  $D$  qui connaissent les temps moyens quelle que soit la particularité de chaque cas – conformément à un modèle d'affectation déterministe.

Cette application sur un outil d'affectation conventionnel conduit à une version grossière de notre modèle dans laquelle le temps de parcours à une occurrence  $\omega$  est modélisé par  $\tilde{t}_a(\bar{x}_a) + \zeta_{a\omega}$  avec la fonction de temps appliqué au débit moyen  $\bar{x}_a$  pendant que l'adaptation dynamique des usagers informés devrait conduire à la fonction  $\tilde{t}_a(x_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}$

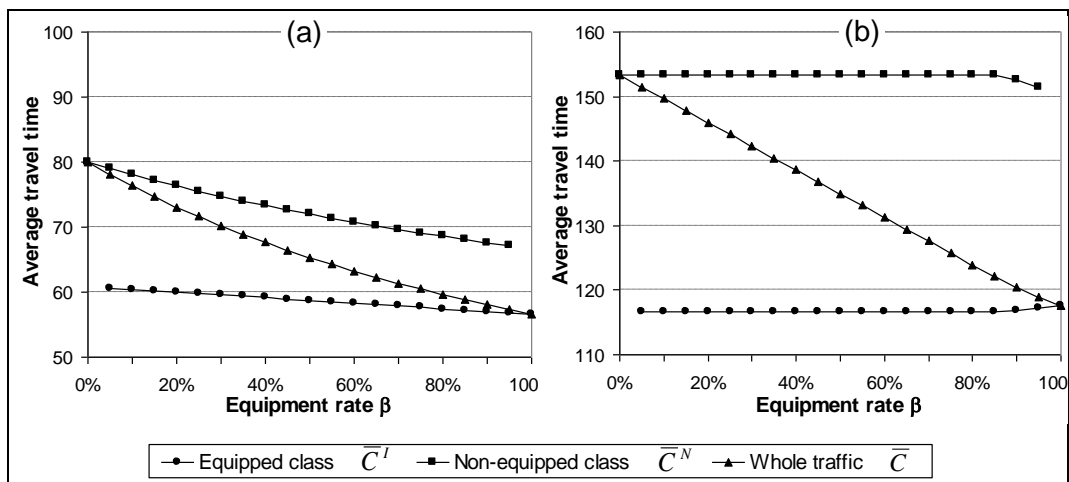


Fig. 6-11 : Temps moyens donnés par modèle grossier à  $Q=20$  (a) et  $Q=130$  (b)

Une application avec les mêmes paramètres que précédemment mène à la Fig. 6–11 pour  $Q$  égal à 20 et 130 respectivement. Pour les deux cas, le modèle grossier donne des résultats plus sensibles, tout en étant beaucoup plus exagérés par rapport à notre modèle fin. Un résultat inquiétant, cependant, est que les usagers non équipés ne tirent aucun avantage indirect à partir de l'équipement de la majorité des usagers.

## **6.6. CONCLUSION DU CHAPITRE**

### **6.6.1. Récapitulation**

Ce chapitre a présenté un modèle fin de l'information dynamique et ses effets sur le trafic en tenant en compte la congestion et les perturbations. Un jeu d'hypothèses complet a été développé, ce qui rend un cadre théorique convenable d'analyser l'équilibre offre-demande. En outre, en prenant des spécifications sur des perturbations, nous avons obtenu des formules analytiques qui ont permis à la fois d'analyser la sensibilité et de faciliter des applications numériques dont les résultats donnent des sens.

L'approche analytique a également été utile pour démontrer les avantages de notre modèle par rapport au courant de modélisation de (Van Vuren et Watling, 1991), (Maher et Hughes, 1995), (Lo et Szeto, 2004), etc. L'hypothèse statistique spécifique au sujet de la perturbation aléatoire a contribué à faciliter le traitement analytique, comme certains des effets sont de faible amplitude, ils seraient difficilement détectables dans une approche numérique basée par exemple sur simulation dynamique microscopique.

Les simulations numériques ont montré que, avec l'information dynamique neutre, il existe un certain taux d'équipement optimal à la diffusion de l'information. L'augmentation de la diffusion de l'information engendre une dégradation de la performance globale du système. En plus, les résultats donnés par deux différentes hypothèses sur la forme des perturbations, à savoir Gaussien et Bernoulli-Exponentiel, ne sont pas sensiblement différents.

### **6.6.2. Recommandation pour les études d'évaluation**

(Maher et Hughes, 1995) ont simulé leur jeu d'hypothèses au moyen d'un logiciel d'affectation statique du trafic aux itinéraires sur un réseau routier. De même les logiciels commerciaux d'affectation statique (Emme, TransCad, Visum, Cube, QRS...) permettent de distinguer plusieurs classes d'utilisateurs selon leur niveau d'information ; mais leur principe pour calculer l'état d'équilibre offre-demande empêche de traiter de manière fine notre jeu amélioré d'hypothèses : car en raison de leur algorithme d'équilibrage, même si chaque classe peut percevoir certaines conditions de trafic, les classes susceptibles de réagir en temps réel ne le feraient que partiellement (cf. le pas d'itération dans la méthode des

combinaisons convexes), et sans que leur réaction amortisse les perturbations brutes.

C'est pourquoi, parmi les logiciels commerciaux à utiliser pour une étude d'évaluation, seuls conviennent actuellement les simulateurs microscopiques du trafic : Paramics, Vissim, Aimsun etc. Pour évaluer effectivement l'utilité de l'information dynamique, il s'agit d'en appliquer un de manière répétitive, en simulant un ensemble de situations diversement perturbées. Pour ce faire, il faut disposer d'une connaissance structurelle et probabiliste des perturbations du trafic sur le réseau étudié, et aussi faire la part entre les sources originelles de perturbation et la réaction du trafic par effet de congestion.

Dans une étude d'évaluation qui serait basée sur une simulation numérique, il convient d'enregistrer les effets des hypothèses en calculant des indicateurs appropriés, tels que les débits par arc et par classe d'utilisateurs non seulement en moyenne (les  $\bar{x}_a^u$ ) mais encore en situation particulière (des  $x_a^u(\omega)$ ).

### 6.6.3. Pistes de développement

Suite à ce chapitre, nous proposons d'investiguer profondément sur les pistes suivantes :

- Sur le contenu de l'information : dans ce chapitre nous n'avons traité que l'information neutre qui incite les utilisateurs à faire des décisions égoïstes. Un développement du modèle sur les différents contenus de l'information, notamment les contenus permettant des décisions coopératives entre les utilisateurs est nécessaire.
- Sur l'interaction entre l'information et d'autres mesures de gestion du trafic : le service d'information est seulement une composante parmi plusieurs mesures de gestion du trafic appliquées sur un réseau, telle que le contrôle de trafic, la tarification de la congestion, etc. Il est nécessaire également de considérer les interactions entre les différentes mesures de gestion déployées par l'opérateur.



## Chapitre 7. Divers motifs de comportement et optimisation du trafic

---

### 7.1.INTRODUCTION

#### 7.1.1.Contexte

Selon ses sources, la congestion routière peut se classer en deux catégories : la congestion récurrente déterminée par les lois de trafic et la congestion non-récurrente due aux incidents, accidents ou autres aléas sur la route. Grâce à l'avancement des technologies, notamment en informatique, communication et techniques de traitement des données, l'exploitant est devenu capable de détecter les perturbations, de mesurer et même d'anticiper l'état du trafic afin de mieux adapter les actions d'exploitation.

L'information concernant les conditions du trafic peut être communiquée aux usagers. Pour les usagers, l'information routière permet de réduire l'inconfort et mieux choisir leurs itinéraires/horaires de départ ou mode de transport lors de leurs déplacements. Pour l'exploitant, l'information aux usagers peut servir à la gestion du trafic.

L'obtention de l'information permet aux usagers d'effectuer leur choix d'itinéraire de manière plus raisonnable. Cependant, leur comportement est par nature individuel : chaque usager choisit l'itinéraire le moins coûteux pour lui sans tenir compte des effets sur les autres usagers. En présence de la congestion, qui est un effet externe que l'usager cause au reste du trafic, ce comportement entraîne un fonctionnement sous-optimal du système par rapport à un état idéal appelé « Optimum du système ». Nous définissons un tel état optimal comme l'état de moindre coût global pour l'ensemble des usagers. Le coût global dépend de l'environnement extérieur au système, mais aussi des adaptations dynamiques du trafic.

L'opérateur de transport et les usagers espèrent que le système de guidage peut aider à atténuer la congestion induite par la croissance sans cesse de la demande. En particulier, les appareils de guidage embarqués au bord de véhicule peuvent être utilisés non seulement pour l'affichage de l'information cartographiques et les conditions de circulation, mais aussi pour la réception de l'information de guidage afin d'optimiser l'ensemble du réseau, par exemple le système introduit par qui minimise le temps total des usagers. Parmi les mesures d'exploitation, il est possible de diffuser de l'information aux usagers afin d'implanter la coopération entre usagers car la différence entre UE et SO est difficilement détectable par l'usager. Il reste à considérer l'équité à long terme. Il est bien connu que dans l'optimum du système, certains usagers doivent être

affectés à des routes plus longues pour éviter qu'ils causent plus de congestion à l'autrui. Cependant, l'implantation de l'optimum du système est difficilement acceptable.

### **7.1.2.Revue bibliographique**

(Wardrop, 1952) a introduit deux principes d'équilibre : le premier, appelé l'équilibre de l'utilisateur, désigne un état plus ou moins naturel des usagers où chacun des usagers cherche à minimiser son coût individuel ; le deuxième, appelé l'optimum du système, désigne un état optimal pour le système où tous les usagers cherchent à minimiser leur coût total du système.

En suite, le problème d'affectation du trafic en optimum du système a été traité dans nombreux travaux. (Sheffi, 1985) a fourni un traitement analytique pour le problème d'affectation du trafic en optimum déterministe du système. Puis (Maher, Stewart *et al.*, 2005) pour le problème d'affectation du trafic en optimum stochastique du système.

L'approche numérique est adressée afin de résoudre le problème d'affectation en optimum du système a été traité par nombreux chercheurs, (Wie, Tobin *et al.*, 1995) et (Peeta et Mahmassani, 1995)

Concernant l'information du trafic aux usagers, la diffusion de l'information « neutre » qui engendre les choix égoïstes des usagers et l'équilibre de l'utilisateur n'est pas efficace (Stier-Moses, 2004), (Correa, Schulz *et al.*, 2005), (Correa, Schulz *et al.*, 2003), (Schulz et Moses, 2003), (Schulz et Stier-Moses, 2006) mais l'optimum du système est difficilement acceptable. (Prashker et Bekhor, 2000) a comparé plusieurs états d'équilibre du trafic : équilibre (déterministe et stochastique) de l'utilisateur et l'optimum du système.

Les chercheurs et les praticiens cherchent également une solution de diffusion de l'information coopérative sans aggraver le problème d'acceptabilité. (Watling, 1990) (Jahn, Möhring *et al.*, 2004) propose de d'implanter un état proche de l'optimum du système sans causer le problème d'acceptabilité. (Paz et Peeta, 2009) inclut la procédure d'apprentissage dans l'analyse.

### **7.1.3.Objectif**

Continuons le cadre de modélisation développé dans le chapitre 6, nous étudierons la notion de l'optimum du système pour un réseau routier soumis à la congestion récurrentes et des perturbations aléatoires en présence de l'information dynamique à laquelle seule une partie des usagers accède. L'optimum du système est aussi le point de référence pour savoir la marge de manœuvre pour évaluer l'efficacité des mesures de gestion du trafic. Dans ces conditions, la stratégie de gestion du réseau par l'opérateur doit s'adapter à la composition du trafic et aux comportements des usagers

Nous définissons plusieurs « *motifs de coopération* », chaque motif correspondant à un certain comportement pour chaque classe d'utilisateurs informés ou non, ou pour les utilisateurs informés à un certain contenu de messages d'information afin d'inciter les comportements. Un motif, appelé l'équilibre des utilisateurs, correspond aux comportements égoïstes, chacun pour soi avec une information égoïste. Au contraire, le motif « optimum du système » correspond à des comportements altruistes. Nous allons considérer aussi un motif intermédiaire des « Informés coopératifs », en supposant que ceux-ci cherchent à minimiser le temps de leur groupe.

Pour chaque motif de coopération, nous étudions également le problème d'acceptabilité, qui est primordial pour l'implantation de la coopération entre les utilisateurs, via un système de nombreux indicateurs.

#### **7.1.4.Méthode**

Nous allons spécifier des types de comportement et l'équilibre du trafic qui en résulte. Nous allons calculer les coûts de chaque état par classe d'utilisateurs, ceux qui nous ont permis de comparer les états associés aux motifs.

L'affectation du trafic en équilibre de l'utilisateur présenté au chapitre 6 sera adapté aux plusieurs motifs de comportement coopératif par une affectation du trafic en pseudo-équilibre de l'utilisateur en internalisant les coûts externes (Sheffi, 1985).

Comme le chapitre précédent, nous nous sommes restreint à un cas d'école : un réseau à deux routes parallèles, avec des formes simples de congestion. Nous avons obtenu des formules analytiques pour les coûts par classe d'utilisateurs, pour les motifs d'équilibre de l'utilisateur et d'optimum du système pour que nous puissions comparer de manière théorique. Pour le motif des Informés coopératifs, nous avons montré par simulation numérique qu'il permet de retirer presque les mêmes bénéfices que l'optimum du système, tout en étant beaucoup mieux acceptable.

#### **7.1.5.Plan du chapitre**

Suite à l'introduction, dans laquelle nous avons présenté le contexte d'étude, notre objectif et l'approche utilisée, la section §7.2 consacre à une présentation du modèle avec la modélisation des effets de l'information dynamique, la définition et l'implantation des motifs de coopération, et puis la formulation des hypothèses. La section §7.3 analyse le pseudo-équilibre pour notre cas d'école. Les acteurs concernés et les acteurs considérés seront abordés en section §7.4. Les sections §7.5, §7.6 et §7.7 seront réservées à une analyse analytique des deux états d'équilibre : l'équilibre de l'utilisateur et l'optimum du système. En section §7.8, nous discutons les stratégies de guidage et les problèmes d'acceptabilité associés et une simulation numérique.

## 7.2.FORMULATION DES HYPOTHESES

### 7.2.1.L'offre de transport

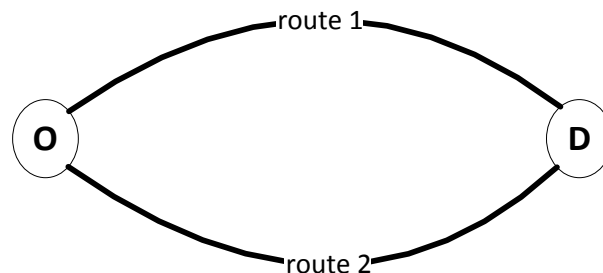


Fig. 7-1 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination

Considérons un réseau de transport se composant de deux arcs  $a \in A$ , l'ensemble des arcs, avec nœuds  $n \in N$ , l'ensemble des nœuds. Notre application sera limitée à un cas d'école, un réseau stylisé de deux arcs en parallèle reliant une origine et une destination, figuré en Fig. 7-1: donc  $a \in \{1,2\}$

Sur chaque arc  $a$  du réseau, le débit  $x_a$  induit un temps de parcours individuel  $T_a$  qui est soumis à des effets de congestion par la base de la fonction temps de parcours-débit  $T_a = \tilde{t}_a(x_a)$ , une fonction croissante du débit en arc. Pour l'instance, nous prenons une fonction affine linéaire comme suivante :  $\tilde{t}_a(x_a) = \alpha_a + \gamma_a x_a$  dans laquelle  $\alpha_a$  est temps de parcours à vide et  $\gamma_a$  la sensibilité du temps de parcours individuel au débit (Fig. 7-2). Cette hypothèse est convenable à un état du trafic sans fil d'attente (peu saturé), pas à un état saturé dans lequel le débit est limité par la capacité d'écoulement.

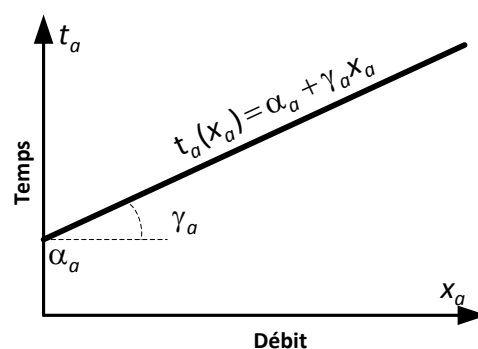


Fig. 7-2 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps

En dépit de notre modèle d'écoulement qui est essentiellement stationnaire, on doit tenir en compte les effets dynamiques inter-période, autrement dit la variabilité inter-période à être modélisée par une variable aléatoire ( $\omega$ ). A cette fin, nous supposons qu'il existe un ensemble  $\Omega$  des circonstances  $\omega$  (ou



périodes), dont chacune correspond à des débits en arc  $x_{a\omega}$  et temps de parcours sur arc :

$$T_{a\omega} = \tilde{t}_a(x_{a\omega}) + \zeta_a(\omega) \quad (\text{eq. 7-1})$$

La variable aléatoire  $\zeta_a(\omega)$  modélise la variation éventuelle du temps de parcours qui paraît due à perturbations exogènes. Cette variable aléatoire est supposée d'avoir variance  $\sigma_a^2$  et moyenne nulle (Fig. 7-3). Pour simplicité, nous supposons que les variables  $\zeta_a(\omega)$  (de deux arcs) sont indépendamment distribuées.

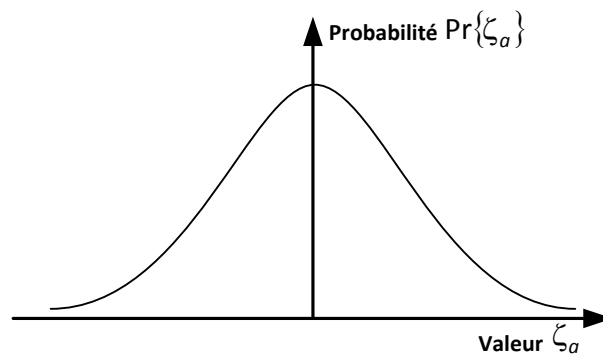


Fig. 7-3 : Distribution gaussienne des perturbations

Nous avons la formule du temps de parcours moyen sur l'ensemble des occurrences :

$$E_{\omega}[T_{a\omega} : x_{a\omega} = x] = \tilde{t}_a(x) \quad (\text{eq. 7-2})$$

### 7.2.2. La demande : comportement individuel et motifs de coopération

Supposons que chaque usager se comporte selon le comportement de la classe qui est un parmi quatre comportements typiques suivant :

- Egoïste : l'usager choisit un itinéraire de façon à minimiser son coût individuel.
- Coopératif dans sa classe : l'usager choisit un itinéraire de façon à minimiser le coût total de sa classe.
- Altruiste envers l'autre classe : l'usager choisit un itinéraire de façon à minimiser un coût comprenant son coût individuel plus le surcoût qu'il cause à l'autre classe.
- Totalement coopératif : l'usager choisit un itinéraire de façon à minimiser le coût total de l'ensemble du trafic.

Quatre comportements de chaque classe forment au total 16 motifs de coopération, allant de l'équilibre de l'utilisateur (UE) dans lequel les deux classes sont égoïstes à l'optimum du système (SO) où les classes sont entièrement coopératives. En plus, nous analysons également le motif « informé coopératif » (IC) dans lequel seuls les usagers informés prennent de l'effort pour minimiser le coût de sa classe.

Pour l'instant, nous nous focalisons sur les conséquences données par tels comportements sur le trafic et sur chaque classe en négligeant comment les implanter.

Supposons que la demande est composée de deux classes d'utilisateurs, respectivement la classe  $I$ , des utilisateurs équipés, en information dynamique et la classe  $N$  des utilisateurs non-équipés, puis non-informés.

Chaque utilisateur du réseau est soumis au temps objectif sur le long de sa route, dit  $a$ , une variable aléatoire :

$$t_{a\omega} = t_a(x_{a\omega}) + \zeta_{a\omega} \quad (\text{eq. 7-3})$$

Dans laquelle  $x_{a\omega} = \bar{x}_a^N + x_{a\omega}^I$  puisque la classe informée réagit à l'information dynamique, et par conséquent à occurrence  $\omega$  pendant que la classe non-informée ne réagit pas pour le court terme

Le temps de parcours  $t_{a\omega}^u$  sur la route  $a$  que connaît un utilisateur de la classe  $u$   $u \in \{I, N\}$  :

$$t_{a\omega}^I = t_{a\omega} \quad (\text{eq. 7-4})$$

$$, \text{ et } t_{a\omega}^N = E_\omega[t_{a\omega}] \quad (\text{eq. 7-5})$$

Supposons que chaque utilisateur se comporte de manière spécifique dépendante de la classe qu'il appartient :

- Le comportement égoïste : l'utilisateur choisit un itinéraire de façon à minimiser son coût individuel :  $G_{a\omega}^{u,\text{self}} = t_{a\omega}^u$ .

- Le comportement coopératif dans sa classe : l'utilisateur choisit un itinéraire de façon à minimiser le coût total de sa classe :

$$G_{a\omega}^{u,\text{class}} = t_{a\omega}^u + x_{a\omega}^u \frac{dt_a}{dx_a}.$$

- Altruiste envers l'autre classe : l'utilisateur choisit un itinéraire de façon à minimiser un coût comprenant son coût individuel plus le surcoût qu'il cause à l'autre classe :  $G_{a\omega}^{u,other} = t_{a\omega}^u + x_{a\omega}^{u,other} \frac{dt_a}{dx_a}$ .
- Totalement coopératif : l'utilisateur choisit un itinéraire de façon à minimiser le coût total de l'ensemble du trafic, c'est-à-dire minimiser son coût individuel ajouté par le coût externe que il impose sur les autres usagers :  $G_{a\omega}^{u,all} = t_{a\omega}^u + x_{a\omega} \frac{dt_a}{dx_a}$ .

### 7.2.3. Les fonctions de pseudo-coût

Dans la littérature, il est bien connu qu'un problème d'optimum du système peut se transformer en problème d'équilibre de l'utilisateur en externalisant les coûts externes de congestion dans une fonction du pseudo-coût individuel: à chaque fonction de coût considérée  $t_a(x_a)$  pour un problème d'optimum du système est associée une fonction de pseudo-coût :

$$t_a^\#(x_a) \equiv t_a(x_a) + x_a \frac{dt_a}{dx_a} \quad (\text{eq. 7-6})$$

En supposant que l'utilisateur perçoit le pseudo-coût  $t_a^\#$  comme son « vrai » coût individuel et choisit la route la moins coûteuse perçue par lui-même. En fin, une affectation en équilibre de l'utilisateur avec les fonctions de pseudo-coût  $t_a^\#$  coïncide à celle en optimum du système avec les fonctions de coût originales  $t_a$ .

Nous adaptons ce principe de transformation aux multiple classes d'utilisateurs et divers motifs de coopération : un utilisateur de la classe  $u$  coopère avec la classe  $v$ , de manière soit active ( $\varepsilon_{uv} = 1$ ) si il considère ses effets de congestion sur cette classe, soit passive ( $\varepsilon_{uv} = 0$ ) si il est indifférent à la classe  $v$ . La fonction de pseudo-coût pour l'utilisateur  $u$  :

$$t_a^{\#u}(x_a) \equiv t_a(x_a) + \frac{dt_a}{dx_a} \cdot \left[ \sum_v \varepsilon_{uv} x_a^v \right]. \quad (\text{eq. 7-7})$$

Le tableau Tab. 7-1 présente les fonctions de pseudo-coût correspondant aux comportements de chaque classe  $u$ . Le tableau Tab. 7-2 précise les fonctions de pseudo-coût pour le cas où les fonctions de coût sont affines linéaires  $t_a(x_a) = \alpha_a + \gamma_a x_a$ , et les perturbations sont centrées  $E_\omega[\zeta_a] = 0$ .

Comportement	Classe informée $I$ : $T_{a\omega}^{\#I} \equiv$	Classe non-informé $N$ : $T_{a\omega}^{\#N} \equiv$
Egoïste	$\zeta_{a\omega} + \tilde{t}_a(x_{a\omega})$	$E[\zeta_{a\omega} + t_a(x_{a\omega})]$
Coopératif dans sa classe	$\zeta_{a\omega} + t_a(x_{a\omega}) + x'_{a\omega} \frac{dt_a}{dx_a}$	$E[\zeta_{a\omega} + t_a(x_{a\omega}) + x'_{a\omega} \frac{dt_a}{dx_a}]$
Altruiste envers l'autre classe	$\zeta_{a\omega} + t_a(x_{a\omega}) + \bar{x}_a^N \frac{dt_a}{dx_a}$	$E[\zeta_{a\omega} + t_a(x_{a\omega}) + \bar{x}_a^N \frac{dt_a}{dx_a}]$
Totalement coopératif	$\zeta_{a\omega} + t_a(x_{a\omega}) + x_{a\omega} \frac{dt_a}{dx_a}$	$E[\zeta_{a\omega} + t_a(x_{a\omega}) + x_{a\omega} \frac{dt_a}{dx_a}]$

Tab. 7-1 : Les fonctions de pseudo-coût par classe par motif de comportement

Pour un motif de comportement, définissons  $\gamma_a^{vu}$  le coefficient intégrant la considération de la classe  $u$  envers la classe  $v$ .

$$T_{a\omega}^{\#I} = \alpha_a + \gamma_a^{NI} \bar{x}_a^N + \gamma_a^{II} x'_{a\omega} + \zeta_{a\omega} \quad (\text{eq. 7-8})$$

$$T_a^{\#N} = \alpha_a + \gamma_a^{NN} \bar{x}_a^N + \gamma_a^{IN} \bar{x}_a^I \quad (\text{eq. 7-9})$$

Comportement	Classe informée $I$ : $T_{a\omega}^{\#I} \equiv$	Classe non-informé $N$ : $T_a^{\#N} \equiv$
Egoïste	$\alpha_a + \gamma_a(\bar{x}_a^N + x'_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}$	$\alpha_a + \gamma_a(\bar{x}_a^N + \bar{x}_a^I)$
Coopératif dans sa classe	$\alpha_a + \gamma_a(\bar{x}_a^N + 2x'_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}$	$\alpha_a + \gamma_a(2\bar{x}_a^N + \bar{x}_a^I)$
Altruiste envers l'autre classe	$\alpha_a + \gamma_a(2\bar{x}_a^N + x'_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}$	$\alpha_a + \gamma_a(\bar{x}_a^N + 2\bar{x}_a^I)$
Totalement coopératif	$\alpha_a + 2\gamma_a(\bar{x}_a^N + x'_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}$	$\alpha_a + 2\gamma_a(\bar{x}_a^N + \bar{x}_a^I)$

Tab. 7-2 : Les fonctions de pseudo coût simplifiées par classe par motif de comportement

#### 7.2.4.Pseudo-équilibre offre-demande

Chaque usager est supposé de choisir son itinéraire sous un comportement rationnel de minimisation de coût, en fonction de sa connaissance sur les coûts. Un usager informé est supposé de connaître exactement le pseudo-coût à chaque cooccurrence.

$$t_a^I(\omega) = T_{a\omega}^{\#I}, \quad (\text{eq. 7-10})$$

Pendant qu'un usager non-équipé est supposé d'effectuer son choix d'itinéraire sur une connaissance grossière sur les coûts moyens :

$$t_a^N = E_{\omega}[T_{a\omega}^{\#N}] \equiv T_a^{\#N}. \quad (\text{eq. 7-11})$$

L'équilibre de l'utilisateur (vrai et/ou pseudo) est formulé en considérant les conditions suivantes :

- (i) Non-négativité des débits
- (ii) Conservation du volume : l'intégralité du volume doit s'affecter aux itinéraires
- (iii) Pseudo-équilibre de l'utilisateur : chaque usager est affecté à un itinéraire de minimal coût pseudo, comme il en perçoit dont la formation des coûts est indiquée dans (eq. 6-8) et (eq. 6-9)

La condition d'équilibre induit deux variables duales  $\mu_{\omega}^I$ ,  $\mu^N$  satisfaisant les conditions suivantes :

$$\mu_{\omega}^I \geq 0, T_{a\omega}^{I\#} - \mu_{\omega}^I \geq 0, x_{a\omega}^I \cdot (T_{a\omega}^{I\#} - \mu_{\omega}^I) = 0 : \forall \omega, a \in \{1,2\} \quad (\text{eq. 7-12})$$

$$\mu^N \geq 0, T_a^{N\#} - \mu^N \geq 0, x_a^N \cdot (T_a^{N\#} - \mu^N) = 0 : \forall a \in \{1,2\} \quad (\text{eq. 7-13})$$

Dans la littérature, il est bien connu qu'un problème d'optimum du système peut se transformer en problème d'équilibre de l'utilisateur en externalisant les coûts externes de congestion dans une fonction du pseudo-coût individuel: à chaque fonction de coût considérée pour un problème d'optimum du système est associée une fonction de pseudo-coût. En supposant que l'utilisateur perçoit le pseudo-coût comme son « vrai » coût individuel et choisit la route la moins coûteuse perçue par lui-même. En fin, une affectation en équilibre de l'utilisateur avec les fonctions de pseudo-coût coïncide à celle en optimum du système avec les fonctions de coût originales.

Nous avons adapté ce principe à multiples classes d'utilisateurs et divers motifs de comportement. Pour un motif de comportement donné, les fonctions de pseudo-coût  $T_{a\omega}^{\#I}$ ,  $T_a^{\#N}$  restent affines (Fig. 7-2) dans lesquelles  $\gamma_a^{uv}$  est le coefficient intégrant la considération de la classe  $u$  envers la classe  $v$ .

La composition du modèle avec pseudo-équilibre est illustrée dans la Fig. 7-4.

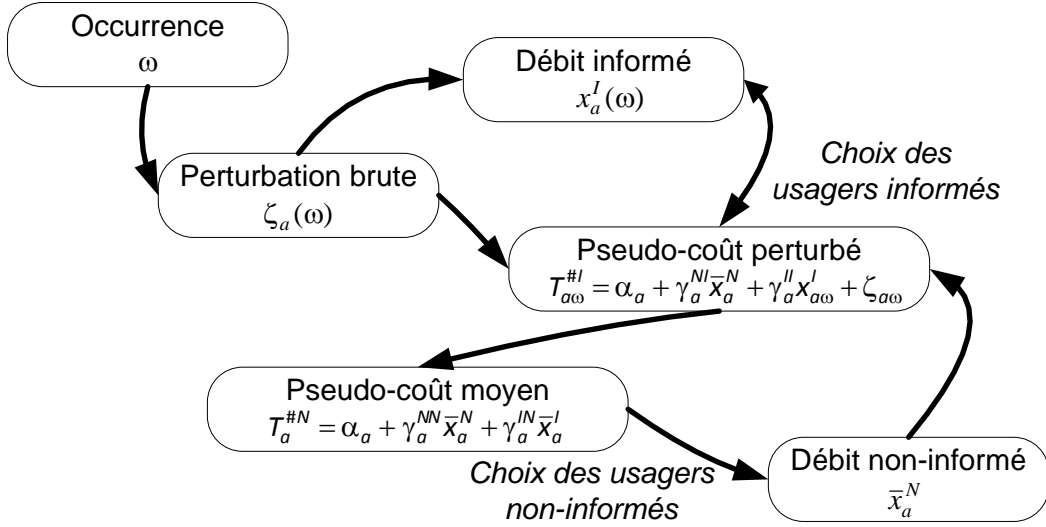


Fig. 7-4 : Les dépendances logiques dans le modèle

A chaque occurrence  $\omega$ , une perturbation brute  $\zeta_a(\omega)$  se produit éventuellement sur chaque arc  $a$ . Ces perturbations brutes participeront à la formation des débits des usagers informés et les pseudo-coûts à travers le choix d'itinéraire des usagers informés en « pseudo-équilibre » de l'utilisateur. Rappelons que seuls les usagers informés sont capables d'effectuer les choix d'itinéraire à court terme.

Les occurrences  $\omega$  dans l'ensemble  $\Omega$  conduisent à former les pseudo-coûts moyens. Les valeurs moyennes des coûts sont perçues par les usagers non-informés grâce à la répétition des déplacements. Ils s'affectent sur les itinéraires en comparant les coûts moyens de deux routes. A leur tour, les débits non-informés vont conditionner la formation des temps de parcours perturbés.

Pour un réseau élémentaire de deux routes, notre traitement analytique suit la logique suivante : en fixant les débits non-informés  $\bar{x}_a^N$ , nous pouvons calculer l'affectation en pseudo-équilibre de la classe informée pour chaque occurrence  $\omega$  (une occurrence  $\omega$  correspond à certaine valeur  $\zeta_a(\omega)$ ). En intégrant les débits informés et les pseudo-coûts perturbés sur l'ensemble des occurrences  $\Omega$ , nous obtenons les débits informés moyens et les coûts moyens. En fin, ces débits et ces coûts moyens détermineront les débits non-informés  $\bar{x}_a^N$ . Ce problème d'affectation devient un problème de point-fixe d'une seule variable, peut être résoudre analytiquement.

### 7.3.ANALYSE D'EQUILIBRE

#### 7.3.1.Affectation instantanée des usagers informés

En notant  $\alpha_a^I = \alpha_a + \gamma_a^{NI} \bar{x}_a^N$ ,  $T_{a\omega} = \alpha_a^I + \gamma_a^{II} x_{a\omega}^I + \zeta_{a\omega}$  est le temps de l'arc  $a$  à l'occurrence  $\omega$ . S'il y avait qu'un usager informé, il choisirait l'itinéraire de

minimum  $T_{a\omega}(0) = \alpha'_a + \zeta_{a\omega}$ . Cependant, la réaffectation dynamique des usagers informés va tenter d'augmenter le temps de cette route due à sa fonction de congestion : cet effet peut résulter une compensation partielle, c'est-à-dire  $T_{a\omega}$  reste encore moins que  $T_{b\omega}$  ou une compensation totale, c'est-à-dire l'égalité des temps :

$$\alpha'_a + \gamma''_a x'_a(\omega) + \zeta_{a\omega} = \alpha'_b + \gamma''_b x'_b(\omega) + \zeta_{b\omega} \quad (\text{eq. 7-14})$$

. Dans le dernier cas,  $x'_a(\omega) + x'_b(\omega) = q'$  conduit à :

$$x'_a(\omega) = \frac{\gamma''_b q' + \alpha'_b + \zeta_b - \alpha'_a - \zeta_a}{\gamma''_a + \gamma''_b} \quad (\text{eq. 7-15})$$

$$T_{a\omega} = \frac{\gamma''_a \gamma''_b q' + \gamma''_a \alpha'_b + \gamma''_b \alpha'_a}{\gamma''_a + \gamma''_b} + \frac{\gamma''_b \zeta_a + \gamma''_a \zeta_b}{\gamma''_a + \gamma''_b}. \quad (\text{eq. 7-16})$$

Dans le cas précédent, nous avons  $x'_{a\omega} = q'$  et  $x'_{b\omega} = 0$ , puis  $T_{a\omega} = \alpha'_a + \gamma''_a q' + \zeta_{a\omega}$  et  $T_{b\omega} = \alpha'_b + \zeta_{b\omega}$ , avec  $T_{a\omega} \leq T_{b\omega}$ . Cette condition est équivalente à :  $\zeta_{b\omega} - \zeta_{a\omega} \geq \alpha'_a - \alpha'_b + \gamma''_a q'$

### 7.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne des usagers informés

Pour calculer les débits par arc moyens des usagers informés, les  $\bar{x}_a^I$ , nous déconditionnons par rapport aux perturbations  $\zeta_1, \zeta_2$  tout en restant conditionnels aux  $\bar{x}_a^N$ .

Notant  $B \equiv \alpha'_1 - \alpha'_2 + \gamma''_1 q'$  et  $A \equiv \alpha'_1 - \alpha'_2 - \gamma''_2 q'$  : conditionnellement à  $z = \zeta_2 - \zeta_1$ , nous avons :

- si  $z > B$  puis  $T_{1\omega}(q') \leq T_{2\omega}(0)$  alors  $x'_1(\omega) = q'$  et  $x'_2(\omega) = 0$ ,
- si  $z < A$  puis  $T_{1\omega}(0) \geq T_{2\omega}(q')$  alors  $x'_1(\omega) = 0$  et  $x'_2(\omega) = q'$ ,
- si  $z \in [A, B]$  puis  $T_{1\omega} = T_{2\omega}$  aux débits  $x'_1(\omega) = \frac{z - A}{\gamma''_1 + \gamma''_2}$  et  $x'_2(\omega) = \frac{B - z}{\gamma''_1 + \gamma''_2}$ .

Ce processus nous mène à définir une fonction  $X'_1(z) \equiv x'_{1\omega}$

En notant  $F$  la fonction de distribution de  $Z = \zeta_2 - \zeta_1$  sur l'ensemble  $\Omega$  des cas  $\omega$  et  $\tilde{F}$  sa fonction moment tronqué  $\tilde{F}(x) = \int^x z dF(z)$ , par agrégations, nous avons :

$$\begin{aligned}\bar{x}_1^I &\equiv E_\omega[x_{1\omega}^I] = \int X_1^I(z) dF(z) \\ &= 0 \cdot \int_{-\infty}^A dF(z) + \int_A^B \frac{z-A}{\gamma_1'' + \gamma_2''} dF(z) + q^I \cdot \int_B^{+\infty} dF(z)\end{aligned}\quad (\text{eq. 7-17})$$

$$\text{, dans laquelle : } \bar{x}_2^I = \frac{G(B) - G(A)}{\gamma_1'' + \gamma_2''} \text{ dont } G(x) \equiv xF(x) - \tilde{F}(x). \quad (\text{eq. 7-18})$$

L'indépendance de  $\zeta_1$  et  $\zeta_2$  entraîne le fait que  $Z$  est une variable aléatoire de moyenne  $\mu = \mu_2 - \mu_1$  et variance  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$

### 7.3.3. Affectation des usagers non-équipés

Notant  $\alpha_a^N \equiv \alpha_a + \gamma_a^{IN} \bar{x}_a^I$  et comparant  $\alpha_1^N$  avec  $\alpha_2^N$  :

- si  $\alpha_1^N \geq \alpha_2^N + \gamma_2^{NN} q^N$  alors  $\bar{x}_2^N = q^N$  et  $\bar{x}_1^N = 0$ .
- si  $\alpha_1^N + \gamma_1^{NN} q^N \leq \alpha_2^N$  alors  $\bar{x}_1^N = q^N$  et  $\bar{x}_2^N = 0$ .
- si  $-\gamma_1^{NN} q^N \leq \alpha_2^N - \alpha_1^N \leq \gamma_2^{NN} q^N$  alors  $\bar{x}_a^N = \frac{\alpha_b^N - \alpha_a^N + \gamma_b q^N}{\gamma_a + \gamma_b}$ .

### 7.3.4. Caractérisation du problème de point fixe

En enchaînant l'ensemble des formules précédentes, nous obtenons que les débits non-informés ( $\bar{x}_a^N$ ) induit les temps de référence d'usagers informés ( $\alpha_a^I$ ), qui, à son tour, déterminent les débits informés moyens ( $\bar{x}_a^I$ ), qui en suite détermine les temps de référence d'usagers non-informés ( $\alpha_a^N$ ), qui enfin déterminent les débits non-informés ( $\bar{x}_a^N$ ). Ce cycle indique que chaque variable parmi ( $\bar{x}_a^N$ ), ( $\bar{x}_a^I$ ), ( $\alpha_a^I$ ), ( $\alpha_a^N$ ) résout a spécifique problème de point-fixe. Pour le cas d'école de deux routes que nous traitons, ce problème est facile à résoudre car il implique à seulement une inconnue : un algorithme de relaxation serait approprié, pour l'instance un algorithme de combinaison convexe aux débits non-informés. Dans la section suivante, une solution analytique est fournie sous certaines hypothèses statistiques des variables aléatoires. Le problème de point-fixe pour la variable ( $\bar{x}_2^I$ ) peut être écrit comme suivant :



$$x_2^N = X_2^N \circ X_2^I(x_2^N) \quad (\text{eq. 7-19})$$

, dans laquelle :

$$\bar{x}_2^I = X_2^I(x_2^N) \text{ avec } \bar{x}_2^I = \frac{G(B) - G(A)}{\gamma_1'' + \gamma_2''}, B(x_2^N), A(x_2^N) \quad (\text{eq. 7-20})$$

$$x_2^N = X_2^N(\bar{x}_2^I) \text{ avec } X_2^N \equiv \min\{q^N, \max\{0, \frac{\alpha_1^N - \alpha_2^N + \gamma_1^{NN} q^N}{\gamma_1^{NN} + \gamma_2^{NN}}\}\}. \quad (\text{eq. 7-21})$$

### 7.3.5. Simplification par hypothèses symétriques

Si les interactions entre les classes sont symétriques, c'est-à-dire  $\gamma_a'' = \gamma_a^{IN} = \gamma_a^{NI} = \gamma_a^{NN} \equiv \tilde{\gamma}_a$ , y compris le motif UE et le motif SO, donc :

$$\begin{aligned} B &= \tilde{t}_1 - \tilde{\gamma}_1 \bar{x}_1^I - \tilde{t}_2 + \tilde{\gamma}_2 \bar{x}_2^I + \tilde{\gamma}_1 q^I \\ &= \tilde{t}_1 - \tilde{t}_2 + (\tilde{\gamma}_2 + \tilde{\gamma}_1) \bar{x}_2^I \end{aligned}$$

Supposons que les pseudo-coûts sont égaux, en combinant avec (eq. 8-16), nous avons :

$$B = G(B) - G(B - (\tilde{\gamma}_2 + \tilde{\gamma}_1) q^I) \quad (\text{eq. 7-22})$$

En outre, si la variable aléatoire  $Z$  est centrée et symétriquement distribuée, nous avons :  $G(-x) = G(x) - x, \forall x$ . Cela implique que (eq. 8-20) est résolue par un  $B$  tel que :  $-B = B - (\tilde{\gamma}_2 + \tilde{\gamma}_1) q^I$ , autrement dit  $B = (\tilde{\gamma}_2 + \tilde{\gamma}_1) q^I / 2 = -A$ . En remplaçant dans la définition de  $B$ , cela implique à son tour une propriété remarquable

$$\bar{x}_a^I = \frac{1}{2} q^I, \quad (\text{eq. 7-23})$$

## 7.4. ACTEURS ET INDICATEURS

Focalisons-nous sur l'analyse économique de différents acteurs, c'est-à-dire chaque usager d'une classe donnée et l'ensemble du trafic qui ressemble à la société.

### 7.4.1. Relation entre les acteurs

Chaque usager de la classe  $u$  effectue un déplacement par occurrence  $\omega$ . Tout au long des occurrences, il ressentit un coût effectif moyen de :

$$\bar{C}^u = \frac{1}{q^u} E_{\omega} [ \sum_{a \in \{1,2\}} x_{a\omega}^u (t_a(x_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}) ]. \quad (\text{eq. 7-24})$$

Cette moyenne concerne le coût effectif par occurrence, pas la fonction de pseudo-coût.

Un usager individuel  $u$  correspond à une unité de débit : s'il utilise la route  $a$  à l'occurrence  $\omega$ , puis il impose à chaque usager un temps de retard  $\dot{t}_a(x_{a\omega})$ , donc l'effet de congestion sur le débit de la classe  $v$ .

$$\chi_{a\omega}^{uv} = x_{a\omega}^v \dot{t}_a(x_{a\omega}) \quad (\text{eq. 7-25})$$

Un usager marginal de la classe  $u$  peut utiliser une route  $a$  à une proportion  $x_{a\omega}^u / q^u$ . Lorsqu'il fait affecter une unité de débit sur les routes en accordance avec l'affectation de  $q^u$  sur les routes à cette occurrence. Cela crée un coût marginal par occurrence :

$$\chi_{\omega}^{uv} = \sum_a x_{a\omega}^v \dot{t}_a(x_{a\omega}) \frac{x_{a\omega}^u}{q^u}. \quad (\text{eq. 7-26})$$

Puis le coût marginal d'un usager de la classe  $u$  sur le trafic de la classe  $v$  :

$$\bar{\chi}_p^{uv} = E_{\omega} [ \sum_a x_{a\omega}^v \dot{t}_a(x_{a\omega}) \frac{x_{a\omega}^u}{q^u} ]. \quad (\text{eq. 7-27})$$

La relation entre l'usager  $u$  et la société est que l'usager subit le coût  $\bar{C}^u$  pendant qu'il induit un coût  $\bar{C}^u + \sum_v \bar{\chi}_p^{uv}$ . La partie  $\bar{\chi}_{uP} \equiv \sum_v \bar{\chi}_p^{uv}$  est le coût externe marginal de la congestion.

#### 7.4.2. Coûts moyens

Sous le motif de coopération P, notant  $\bar{C}_p^u$  le coût moyen par déplacement par usager de la classe  $u$ . Le calcul de  $\bar{C}_p^N$  est direct car  $x_{a\omega}^N$  est toujours fixé, égale à  $\bar{x}_a^N$ .

$$\bar{C}_p^N = [\bar{x}_1^N (\alpha_1 + \gamma_1 \bar{x}_1) + \bar{x}_2^N (\alpha_2 + \gamma_2 \bar{x}_2)] / q^N. \quad (\text{eq. 7-28})$$

Pour calculer le coût moyen pour un usager informé,  $\bar{C}_p^I = E_{\omega} [x_{1\omega}^I t_{1\omega} + x_{2\omega}^I t_{2\omega}] / q^I$ , nous utilisons une décomposition conditionnelle de  $Z$ .

$$\bar{C}_p^I = \frac{1}{q^I} \int E[X_1^I(z)T_{1\omega} + (q^I - X_1^I(z))T_{2\omega}] dF(z). \quad (\text{eq. 7-29})$$

Par la procédure de calcul, détaillé en annexes, nous obtenons

$$\begin{aligned} \bar{C}_p^I = & (\alpha_2^{I0} + \gamma_2 q^I) F_A + (\alpha_1^{I0} + \gamma_1 q^I) (1 - F_A) \\ & + \frac{\gamma_1 \gamma_{\#} q^I + \gamma_{\#} B_0 - \gamma B}{\gamma_{\#}^2 q^I} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(F_B - F_A)) \\ & + \frac{\gamma - \gamma_{\#}}{\gamma_{\#}^2 q^I} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A)) + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF \end{aligned} \quad (\text{eq. 7-30})$$

, dans laquelle :  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ ,  $\gamma_{\#} = \gamma_1'' + \gamma_2''$ ,  $\alpha_a^{I0} = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^N$ ,  $B_0 \equiv \alpha_1^{I0} - \alpha_2^{I0} + \gamma_1 q^I$  et fonction  $\tilde{F}(x) = \int^x z^2 dF(z)$ .

Agrégeant l'ensemble des usagers de deux classes, nous obtenons le coût moyen par usager, par déplacement :

$$\bar{C}_p \equiv \beta \bar{C}_p^I + (1 - \beta) \bar{C}_p^N. \quad (\text{eq. 7-31})$$

#### 7.4.3. Gain privé de l'information

La différence entre les coûts moyens pour la classe non-informée et la classe informée :

$$\Gamma_p^{\text{self}} \equiv \bar{C}_p^N - \bar{C}_p^I \quad (\text{eq. 7-32})$$

est le gain privé associé à l'accès à l'information dynamique. Cet indicateur signifie aussi l'intérêt d'être équipé d'un usager du réseau

#### 7.4.4. Coûts externes marginaux

Décomposons le coût total du système par classe d'usagers

$$Q \bar{C}_p = q^I \bar{C}_p^I + q^N \bar{C}_p^N = \sum_{v \in \{I, N\}} q^v \bar{C}_p^v \quad (\text{eq. 7-33})$$

Par définition, le coût marginal d'une classe d'usagers  $u$  donnée est :  $\delta(Q \bar{C}_p) / \delta q^u$  qui se divise en deux, la partie interne  $\bar{C}_p^u$  et la partie externe  $\delta(Q \bar{C}_p) / \delta q^u - \bar{C}_p^u$ .

Dans notre modèle  $q^v \bar{C}_p^v = E_{\omega} [\sum_{a \in \{1, 2\}} x_{a\omega}^v T_{a\omega}(x_{a\omega})]$  qui permet de dériver le coût marginal de deux façons.

A partir de la définition basique :  $\frac{\partial}{\partial q^u}(q^v \bar{C}_p^v) = \delta_{uv} \bar{C}_p^u + q^v \frac{\partial}{\partial q^u}(\bar{C}_p^v)$

Dans notre modèle, comme  $\partial x_{a\omega}^v / \partial q^u = \delta_{uv} x_{a\omega}^u / q^u$

$$\frac{\partial}{\partial q^u} E_{\omega} [\sum_{a \in \{1,2\}} x_{a\omega}^v T_{a\omega}(x_{a\omega})] = \delta_{uv} E [\sum_a \frac{x_{a\omega}^u}{q^u} T_{a\omega}] + E [\sum_a x_{a\omega}^v \dot{t}(x_{a\omega}) \cdot \frac{x_{a\omega}^u}{q^u}] = \delta_{uv} \bar{C}_p^u + \bar{\chi}_p^{uv}$$

En inspectant, nous obtenons :  $\bar{\chi}_p^{uv} = q^v \partial \bar{C}_p^v / \partial q^u$ , comme espéré : le coût marginal d'une classe d'utilisateur  $u$  au système est :

$$\frac{\partial}{\partial q^u}(Q \bar{C}_p) = \bar{C}_p^u + \bar{\chi}_p^{ul} + \bar{\chi}_p^{uN} \quad (\text{eq. 7-34})$$

Pour calculer un coût externe  $\bar{\chi}_p^{uv}$ , supposons qu'une fonction analytique  $\bar{C}_p^v = \psi(Q, \beta)$  soit existant pour le coût moyen de la classe  $v$  en fonction de  $Q$  et  $\beta$ . Les dérivées de  $\psi$  en fonction de  $Q$  et  $\beta$  peuvent être utilisées pour évaluer  $\bar{\chi}_p^{uv}$  de manière suivante.

Une variation  $\delta q^l$  induit  $\delta Q = \delta q^l$  puis  $\delta Q / \delta q^l = 1$ . La variation induite  $\delta \beta$  est tel que  $(\beta + \delta \beta)(Q + \delta Q) = q^l + \delta q^l$ , donc  $Q \cdot \delta \beta + \beta \cdot \delta Q = \delta q^l$  qui donne que  $\delta \beta / \delta q^l = (1 - \beta) / Q$ .

De même façon, une variation  $\delta q^N$  induit  $\delta Q = \delta q^N$  donc  $\delta Q / \delta q^N = 1$ . La variation induite  $\delta \beta$  est telle que  $(\beta + \delta \beta)(Q + \delta Q) = q^N$ , donc  $Q \cdot \delta \beta + \beta \cdot \delta q^N = 0$  qui donne que  $\delta \beta / \delta q^N = -\beta / Q$ .

En ensemble,  $\delta Q / \delta q^u = 1$  et  $\delta \beta / \delta q^u = (\delta_{ul} - \beta) / Q$  dans laquelle  $\delta_{ul} = 1$  si  $(u = l)$  ou  $\delta_{ul} = 0$  si  $(u \neq l)$ .

Par la règle de chaîne de dérivation :

$$\frac{\delta \psi}{\delta q^u} = \frac{\partial \psi}{\partial Q} \frac{\delta Q}{\delta q^u} + \frac{\partial \psi}{\partial \beta} \frac{\delta \beta}{\delta q^u} = \frac{\partial \psi}{\partial Q} + \frac{\delta_{ul} - \beta}{Q} \frac{\partial \psi}{\partial \beta} \quad (\text{eq. 7-35})$$

Cela permet de conclure :

$$\bar{\chi}_p^{uv} = q^v \left[ \frac{\partial \bar{C}^v}{\partial Q} + \frac{\delta_{ul} - \beta}{Q} \frac{\partial \bar{C}^v}{\partial \beta} \right] \quad (\text{eq. 7-36})$$

#### 7.4.5. Gain externe de l'information

Notons  $\bar{\chi}_{uP} \equiv \sum_v \bar{\chi}_p^{uv}$  le coût externe d'un usager de la classe  $u$  sous le motif de coopération  $P$ . Pour l'ensemble des usagers, la différence entre les coûts externes d'un usager non-informé et un usager informé :  $\Gamma_p^{\text{ext}} \equiv \bar{\chi}_{MP} - \bar{\chi}_{NP}$ , est le gain externe du système associé à la diffusion de l'information dynamique à un usager marginal, par exemple, l'équipement en information d'un usager précédemment non-informé. Ce gain peut justifier la subvention d'un usager pour l'usage de l'information dynamique

### 7.5. SUR LE MOTIF D'EQUILIBRE DE L'USAGER (RAPPEL)

Les motifs de comportement d'équilibre de l'utilisateur (UE) et d'optimum du système (SO) représentent des significations économiques majeures dont les formules montrent de belles propriétés analytiques. Cela nous permet d'étudier les motifs basiques d'une manière paramétrique qui rend des propriétés contrôlés et génériques.

#### 7.5.1. Coût moyen par classe d'utilisateurs

Sous le motif d'équilibre de l'utilisateur, chaque usager se comporte de manière égoïste, par conséquent  $\gamma_a^{uv} = \gamma_a, \forall (u,v) \in \{I, N\} \times \{I, N\}$ . Puis  $\gamma_{\#} = \gamma$  et  $B_0 = B$ , (eq. 7-30) est simplifiée à :

$$\bar{C}_{UE}^I = \bar{t}_1 - AF_A + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF, \quad (\text{eq. 7-37})$$

Dans laquelle  $\bar{\zeta}_{a/z} = E[\zeta_{a\omega} : Z(\omega) = z]$ , supposons que  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$ , c'est-à-dire la route 1 est utilisée par les usagers non-informés.

Comme  $\bar{t}_1 = \bar{C}_{UE}^N$ , le gain privé de l'information est toujours positif car  $\Gamma_{UE}^{\text{self}} = \bar{C}_{UE}^N - \bar{C}_{UE}^I = G(A)$  et  $G$  est une fonction positive.

Pour le cas où les deux coûts moyens sont égaux ( cf. Annexes):

$$\bar{C}_{UE}^N = \frac{\gamma_1 \gamma_2 Q + \alpha_1 \gamma_2 + \alpha_2 \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \equiv \theta \quad (\text{eq. 7-38})$$

Qui représente également le coût moyen en absence de l'information et de perturbations, et  $A = -\frac{1}{2}\gamma\beta Q$  donc :

$$\bar{C}_{UE}' = \theta - G(-\frac{1}{2}\gamma\beta Q) \quad (\text{eq. 7-39})$$

, et  $\Gamma_{UE}^{\text{self}} = G(-\frac{1}{2}\gamma\beta Q).$  (eq. 7-40)

### 7.5.2. Gain privé : analyse de sensibilité

Car  $G$  est une fonction croissante et positive, la formule (eq. 7-40) implique que le gain privé de l'information décroît avec le volume de demande  $Q$ , le taux d'équipement  $\beta$ , et la sensibilité à la congestion  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ .

Si les perturbations suivent une loi Gaussienne donc  $G(z) = \sigma g(z/\sigma)$  dans laquelle  $\sigma$  est la variance de  $Z$  et  $g(x) = \phi(x) + x\Phi(x)$ , une fonction croissante, positive, illustrée en Fig. 7-5.

$$\Gamma_{UE}^{\text{self}} = \sigma g(-\frac{\gamma\beta Q}{2\sigma}), \quad (\text{eq. 7-41})$$

Cette formule signifie que le gain privé de l'information est une fonction croissante de la dispersion  $\sigma$  des perturbations.

Le coût moyen pour l'ensemble des usagers est :

$$\bar{C}_{UE} = \theta - \beta G(-\frac{1}{2}\gamma\beta Q), \quad (\text{eq. 7-42})$$

Donc le bénéfice de l'information dynamique pour l'ensemble du système s'élève à :

$$Q\bar{C}_{UE}'(\beta=0) - Q\bar{C}_{UE}'(\beta) = \beta Q G(A) = \beta Q G(-\frac{1}{2}\gamma\beta Q). \quad (\text{eq. 7-43})$$

Cette fonction est positive, en fonction de  $\beta Q$ , elle croît au début, puis décroît.

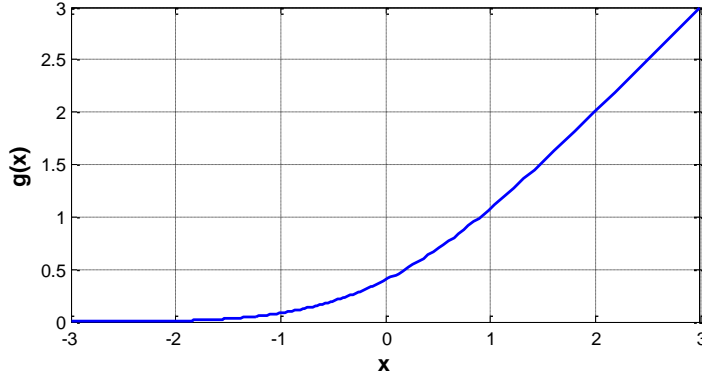


Fig. 7-5 : Fonction mesurant le gain individuel de l'information

### 7.5.3. Coût social marginal

Supposons que les coûts moyens sont égaux, nous avons :  $\partial \bar{C}_{UE}^N / \partial \beta = 0$  et :

$$\frac{\partial}{\partial q^u} \bar{C}_{UE}^N = \frac{\partial}{\partial q^u} \theta = \frac{\partial}{\partial Q} \theta = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \equiv \dot{\theta} \quad (\text{eq. 7-44})$$

Comme  $\partial \bar{C}' / \partial Q = \dot{\theta} + \frac{1}{2} \gamma \beta F(A)$  et  $\partial \bar{C}' / \partial \beta = \frac{1}{2} \gamma Q F(A)$ , d'après §3.4 nous avons le coût externe marginal par classe d'utilisateurs :

$$\bar{\chi}_{UE}' = q^N \dot{\theta} + q' [\dot{\theta} + \frac{\gamma \beta}{2} F_A + \frac{1-\beta}{Q} (\frac{\gamma Q}{2} F_A)] = Q \dot{\theta} + \frac{\gamma \beta Q}{2} F(-\frac{\gamma \beta Q}{2}) \quad (\text{eq. 7-45})$$

$$\bar{\chi}_{UE}^N = Q \dot{\theta}. \quad (\text{eq. 7-46})$$

Donc le gain externe marginal de l'information est :

$$\Gamma_{UE}^{\text{ext}} \equiv \bar{\chi}_{UE}^N - \bar{\chi}_{UE}' = -\frac{\gamma \beta Q}{2} F(-\frac{\gamma \beta Q}{2}). \quad (\text{eq. 7-47})$$

Il s'agit d'une quantité négative car  $F$  est positive : notant que sous hypothèse d'égalité des coûts moyens, l'information dynamique ne bénéficie pas les utilisateurs non-informés, la rationalité est que plus les utilisateurs sont informés, moins le profit individuel est dérivé à chacun pour être informé. Rappelons (28) et la définition de  $G$ , le gain social marginal total est :

$$\Gamma_{UE}^{\text{self}} + \Gamma_{UE}^{\text{ext}} = -\gamma \beta Q F(-\frac{\gamma \beta Q}{2}) - \tilde{F}(-\frac{\gamma \beta Q}{2}), \text{ dans laquelle le signe devrait varier avec } \gamma \beta Q.$$

## 7.6. SUR LE MOTIF D'OPTIMUM DU SYSTEME

Le motif d'optimisation du système fournit une référence pour les motifs alternatifs car il correspond à la minimisation du coût global. Cette section est

consacrée à la définition et les propriétés du motif SO, bien évidemment avec en présence de l'information dynamique du trafic. La comparaison entre UE et SO est abordée dans la section §8.6.6 et le déploiement et l'acceptabilité sont discutés dans la section 7

### 7.6.1. Une définition d'optimum bi-niveau

Une affectation de demande donnée consiste des vecteurs de débit  $(x_a^N)_a$ ,  $(x_{a\omega}^I)_{a\omega}$ . Cela mène à un coût global :

$$J \equiv E_{\omega}[\sum_a x_{a\omega} T_{a\omega}], \quad (\text{eq. 7-48})$$

, dans laquelle  $x_{a\omega} = x_a^N + x_{a\omega}^I$  et  $T_{a\omega} = t_a(x_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}$ .

Le motif SO correspond à une affectation de demande telle que la fonction J est minimisée. Sous  $(x_a^N)_a$  donné, le problème est de trouver un état SO qui peut être décentralisé en un problème par occurrence  $\omega$  :

$$\min_{x_a^I} J_{\omega}(x_a^I | x_a^N) = \sum_{a \in \{1,2\}} (x_a^N + x_a^I) \cdot (t_a(x_a^N + x_a^I) + \zeta_{a\omega}) \quad (\text{eq. 7-49})$$

A une occurrence donnée, le terme  $\zeta_{a\omega}$  est constant, donc chaque problème décentralisé est un problème classique (non-perturbé) : cela légitime la démarche de court terme mené dans la section § 2.2 pour affecter les usagers informés conditionnellement aux débits non-informés.

En agrégeant les coûts optimaux décentralisés  $J_{\omega}^*(x_a^N) = J_{\omega}(x_{a\omega}^{I*} | x_a^N)$  nous obtenons une fonction de coût global en fonction seuls des débits non-informés :

$$\tilde{J}(x_a^N) = E_{\omega}[J_{\omega}^*(x_a^N)] \quad (\text{eq. 7-50})$$

Dérivation de  $\tilde{J}$  en fonction de  $x_b^N$  donne :

$$\frac{\partial \tilde{J}}{\partial x_b^N} = \sum_a E_{\omega}[(\delta_{ab} + \frac{\partial x_{a\omega}^I}{\partial x_b^N})[t_a(x_{a\omega}) + \zeta_{a\omega}] + x_{a\omega} \dot{t}_a(x_{a\omega})(\delta_{ab} + \frac{\partial x_{a\omega}^I}{\partial x_b^N})] \quad (\text{eq. 7-51})$$

Pour chaque occurrence  $\omega$ ,  $\partial x_{a\omega}^I / \partial x_b^N = 0$  si  $Z(\omega) \leq A'$  ou  $\geq B'$ ,  $A' \leq B'$  étant l seuil d'intégration, conditionnellement à  $(x_a^N)_a$ . Sur le domaine intermédiaire  $Z(\omega) \in [A', B']$ , « l'affectation social » des usagers informés donne l'égalité des coûts sociaux  $T_{a\omega}^{I\#}$ , puis :



$$\frac{\partial x'_{1\omega}}{\partial x'_b} T_{1\omega}^\# + \frac{\partial x'_{2\omega}}{\partial x'_b} T_{2\omega}^\# = T_{a\omega}^\# \frac{\partial (x'_{1\omega} + x'_{2\omega})}{\partial x'_b} = T_{a\omega}^\# \frac{\partial q'}{\partial x'_b} = 0 \quad (\text{eq. 7-52})$$

Cela nous permet d'abandonner le terme  $\partial x'_{a\omega} / \partial x'_b$  pour les étapes suivantes

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{J}}{\partial x'_b} &= E_\omega [t_b(x_{b\omega}) + \zeta_{b\omega} + x_{b\omega} \dot{t}_b(x_{b\omega})] \\ &= E_\omega [t_b(x_{b\omega}) + x_{b\omega} \dot{t}_b(x_{b\omega})] \end{aligned} \quad (\text{eq. 7-53})$$

Cette formule consiste d'une approche de long terme mené dans §7.3.3 pour affecter les non-informés, conditionnellement des débits informés moyens. Cela nous permet de conclure que les fonctions de pseudo-coût introduites dans §7.2.3 pour résoudre le problème d'affectation du motif SO sont rigoureuses.

### 7.6.2. Coûts moyens par classe

En résolvant la solution d'équilibre, nous obtenons les formules  $\bar{C}_{SO}^N$  et  $\bar{C}_{SO}^I$  à partir respectivement de (eq. 7-28) and (eq. 7-30). Les paramètres spécifiés pour le motif SO sont :  $\gamma_a^{uv} = 2\gamma_a \forall u, v \in \{N, I\}$ , qui induit  $\gamma_\# = 2\gamma$ ,  $\alpha_a^{I0} = (\alpha_a^I + \alpha_a)/2$  et  $\gamma_\# B_0 - \gamma B = \gamma(\alpha_1 - \alpha_2)$ . Ces dernières formules donnent certaine simplification :

$$\begin{aligned} \bar{C}_{SO}^I &= \frac{1}{2} \bar{t}_1^I + \frac{\alpha_1}{2} - \frac{\bar{x}_2^I}{2q'} (\alpha_1 - \alpha_2) - \frac{1}{2} A F_A - \frac{1}{4\gamma q'} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A)) \\ &\quad + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF \end{aligned} \quad (\text{eq. 7-54})$$

Car  $\int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF = \tilde{F}_A$ , nous obtenons:

$$\bar{C}_{SO}^I = \frac{1}{2} \bar{t}_1^I + \frac{\alpha_1}{2} - \frac{\bar{x}_2^I}{2q'} (\alpha_1 - \alpha_2) - \frac{1}{2} G(A) + \frac{1}{2} \tilde{F}_A - \frac{1}{4\gamma q'} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A)) \quad (\text{eq. 7-55})$$

Supposons que les perturbations suivent des distributions Gaussiennes, les indicateurs de coût sont détaillés, pour le cas d'égalité des coûts, comme suivant :

$$\bar{C}'_{SO} = \theta + \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{4\gamma} - \frac{\sigma^2}{2\gamma\beta Q} \left[ \frac{1}{2} - F(-\gamma\beta Q) \right] - \frac{1}{2} G(-\gamma\beta Q) \quad (\text{eq. 7-56})$$

$$\bar{C}^N_{SO} = \theta - \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{4\gamma(1-\beta)Q} - \frac{\beta(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{4\gamma(1-\beta)} \quad (\text{eq. 7-57})$$

Le paramètre  $\theta$  est équivalent à  $\frac{\gamma_1\gamma_2Q + \alpha_1\gamma_2 + \alpha_2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$  dans le motif UE, dans lequel il représente le coût moyen en équilibre. Le paramètre  $\theta - \Delta\alpha^2 / 4\gamma Q \equiv \theta'$  indique le coût moyen par usager par déplacement sous le motif SO sans information dynamique ( $\beta=0$ )

Si les deux routes ont le même coût social, donc  $\bar{x}'_a = q' / 2$  comme le cas d'égalité des coûts dans le motif UE.

### 7.6.3. Analyse de sensibilité

Pour un usager non-informé, dans le cas d'égalité des couts sociaux :

$$\bar{C}^N_{SO} = \theta' - \frac{\beta}{4\gamma(1-\beta)} \left[ \frac{\Delta\alpha^2}{Q} + \Delta\alpha \cdot \Delta\gamma \right] \quad (\text{eq. 7-58})$$

Le signe de  $\bar{C}^N_{SO} - \theta'$  dépend du terme en parenthèses. Si les paramètres de configuration sont positifs, l'information dynamique améliore le coût des usagers informés sous le motif SO.

Pour un usager informé, le coût moyen donné dans (40a) comprend  $\theta$  plus trois termes additionnels qui sont respectivement dépendent du réseau, négatif et négatif.

Le coût moyen par déplacement est facile pour analyser :

$$\bar{C}_{SO} = \theta' - \frac{\sigma^2}{2\gamma Q} \left[ \frac{1}{2} - F(-\gamma\beta Q) \right] - \frac{\beta}{2} G(-\gamma\beta Q) \quad (\text{eq. 7-59})$$

, qui est inférieur à  $\theta' = \bar{C}_{SO}(\beta=0)$ . La différence gagne  $\bar{C}_{SO} - \theta'$  plus large si  $\sigma$  augmente mais elle diminue avec  $\gamma$  et  $Q$ . Les effets du taux d'équipement dépendent également d'autres paramètres.

#### 7.6.4. Coût externe marginal

Comme l'expression de  $\bar{\chi}_{SO}^{uv} = q^v \delta \bar{C}^v / \delta q^u$  est assez révélateur, focalisons nous sur le gain externe d'un usage marginal de l'information :

$$\begin{aligned}\Gamma_{SO}^{\text{ext}} &= q^N \left( \frac{\partial \bar{C}^N}{\partial q^N} - \frac{\partial \bar{C}^N}{\partial q^I} \right) + q^I \left( \frac{\partial \bar{C}^I}{\partial q^N} - \frac{\partial \bar{C}^I}{\partial q^I} \right) \\ &= -(1-\beta) \frac{\partial \bar{C}^N}{\partial \beta} - \beta \frac{\partial \bar{C}^I}{\partial \beta}\end{aligned}\quad (\text{eq. 7-60})$$

Après la simplification, donc :

$$\Gamma_{SO}^{\text{ext}} = \frac{\beta(2-\beta)\Delta\alpha.\Delta\gamma+\Delta\alpha^2/Q}{4\gamma(1-\beta)} + \frac{1}{2}\sigma^2 \dot{F}(-\gamma\beta Q) - \frac{1}{2}\gamma\beta Q F(-\gamma\beta Q) - \frac{\sigma^2}{2\gamma Q} \left[ \frac{1}{2} - F(-\gamma\beta Q) \right] \quad (\text{eq. 7-61})$$

Donc le signe peut varier en fonction des paramètres.

#### 7.7. L'EQUILIBRE DE L'USAGER VERSUS L'OPTIMUM DU SYSTEME

Comparons le motif d'équilibre de l'utilisateur (UE) avec l'optimum du système (SO) qui fixe un coût minimum de référence, mais moins facile à mettre en œuvre que l'équilibre de l'utilisateur. Nous allons nous limiter à une analyse paramétrique en supposons que sous chaque motif, il y a l'égalité des pseudo-coûts moyens. Cela correspond à la situation où le réseau est assez congestionné. Le cas d'inégalité des coûts moyens sera étudié par simulation numérique.

##### 7.7.1. Coût moyen

Mesurons le bénéfice de la coopération par la différence entre le coût moyen du motif UE et celui du motif SO, notant  $\Delta \equiv \bar{C}_{UE} - \bar{C}_{SO}$ .

A partir des formules précédentes,  $\Delta$  est divisé en trois termes :

$$\Delta = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{4\gamma Q} + \frac{\sigma^2}{2\gamma Q} \left[ \frac{1}{2} - F(-\beta\gamma Q) \right] - \beta \left[ G(-\frac{1}{2}\beta\gamma Q) - \frac{1}{2}G(-\beta\gamma Q) \right] \quad (\text{eq. 7-62})$$

Le premier terme  $\frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{4\gamma Q}$  représente l'utilité de la coopération entre les usagers, en l'absence de perturbations et d'information. Ce terme dépend des paramètres du réseau et du niveau de demande  $Q$ .

Le deuxième terme  $\frac{\sigma^2}{2\gamma Q} \left( \frac{1}{2} - F(-\beta\gamma Q) \right)$  représente signifie la contribution spécifique de l'information dynamique en présence de perturbations. Ce terme

augmente en fonction du taux d'équipement  $\beta$  et de l'ampleur des perturbations  $\sigma^2$ .

Le troisième terme  $-\beta.\sigma.\left[g\left(-\frac{\beta\gamma Q}{2\sigma}\right)-\frac{1}{2}g\left(-\frac{\beta\gamma Q}{\sigma}\right)\right]$  est une perte causée par l'information : c'est un terme du deuxième ordre.

A fin d'analyser l'interaction entre la coopération et l'information dynamique, nous pouvons comparer les différents états de trafic  $UE(\beta=0)$ ,  $SO(\beta=0)$ ,  $UE(\beta)$  et  $SO(\beta)$ . Le gain  $\Delta_0$  de  $UE(\beta=0)$  à  $SO(\beta=0)$  n'est pas du à l'information dynamique et il est indépendant de  $\beta$ . Entre  $UE(\beta=0)$  et  $UE(\beta)$ , l'information dynamique du trafic donne un bénéfice moyen par usager de  $-\beta G(-\frac{1}{2}\beta\gamma Q)$ . Entre  $SO(\beta=0)$  et  $SO(\beta)$ , l'information dynamique donne un bénéfice moyen par usager de  $\frac{\sigma^2}{2\gamma Q}[\frac{1}{2}-F(-\beta\gamma Q)]+\frac{\beta}{2}G(-\beta\gamma Q)$  dont le deuxième terme est deux fois moins que son homologue du motif UE mais le premier terme donne un bénéfice supplémentaire liée à  $\sigma^2$ .

### 7.7.2.Coût global

Le gain en temps global du motif UE à motif SO est  $Q\Delta$ , qui est délimité par  $(\Delta\alpha^2 + \sigma^2)/4\gamma$ , un constant indépendant de  $Q$ . Cela est issu de l'hypothèse de linéarité des fonctions débit-temps. La borne supérieure donne une bonne approximation au bénéfice quand  $\gamma\beta Q$  est élevé : cela montre que l'information dynamique permet la société de gagner une proportion supplémentaire  $(\sigma/\Delta\alpha)^2$  de coût.

### 7.7.3.Coût moyen par classe d'usagers

Pour un usager non-informé, le motif So fournit un bénéfice (par déplacement) de  $\Delta_0 + \frac{\beta}{1-\beta}(\Delta_0 + \frac{\Delta\alpha.\Delta\gamma}{4\gamma})$ , l'information dynamique est concernée dans la deuxième terme avec effets positifs permanents si  $\Delta\alpha.\Delta\gamma \geq 0$ .

Pour un usager informé, le motif SO fournit un bénéfice (par déplacement) de  $\sigma^2[\frac{1}{2}-F(-\beta\gamma Q)]/2\gamma\beta Q$ , plus un terme  $\Delta\alpha.\Delta\gamma/4\gamma$  dont le signe dépend de la configuration du réseau, plus un dernier terme  $\frac{1}{2}G(-\beta\gamma Q)-G(-\frac{1}{2}\beta\gamma Q)$  signifiant la perte. L'ampleur  $\sigma$  des perturbations influence les fonctions F et G. Les effets globaux dépendent du deuxième terme, qui est crucial dans l'interaction des deux classes d'usagers car sous le motif SO, un coût de  $\beta Q.\Delta\alpha.\Delta\gamma/4\gamma$  est transféré des usagers non-informés vers les usagers informés, avec un signe

algébrique déterminé par la configuration du réseau. Dans le cas « autoroute vs artère urbaine », c'est un transfert de coût de la classe non-informée à la classe informée.

## **7.8.APPLICATION A LA GESTION ET A L'OPTIMISATION DU TRAFIC**

### **7.8.1.Stratégie d'information et gestion du système**

La stratégie « neutre » d'information consiste à communiquer les coûts individuels de déplacement, principalement les temps objectifs de parcours, aux usagers et de laisser chacun choisir l'itinéraire qui lui convient le mieux. Cette stratégie d'information engendre le comportement égoïste des usagers, et l'état du système dénommé « équilibre de l'utilisateur ».

Mais pour améliorer l'état du système, l'opérateur peut tenter d'orienter le choix d'itinéraire des usagers en leur délivrant une information qui internalise la gêne causée aux autres usagers. En délivrant les temps de parcours augmentés  $\hat{t}_{ao}^I$  aux usagers informés par les média dynamiques, et les temps moyens augmentés  $\hat{t}_a^N$  sur les média fixes (panneaux fixes de signalisation, cartes routières) aux usagers non équipés en information dynamique, l'opérateur met l'utilisateur en situation de choisir un itinéraire qui améliore l'état du système.

Il reste toutefois une question d'importance : l'acceptabilité, autrement dit la confiance de l'utilisateur envers le fournisseur d'information. Si l'utilisateur non informé dynamiquement mais qui pratique régulièrement le réseau estime par sa propre expérience un temps autre que celui diffusé par les média statiques, il ne leur fait pas confiance, autrement dit il n'accepte pas l'information officielle. Les usagers non informés dynamiquement constituent la cible la plus contraignante pour l'opérateur d'information, qui ne peut guère déformer la réalité. En revanche les usagers équipés pour l'information dynamique se prêtent mieux à une information qui se révélerait bénéfique en moyenne, sur un ensemble de cas : alors leur expérience est que le système d'information leur procure un gain par rapport à toute stratégie individuelle de choix d'itinéraire. Pour retirer ce gain sur un ensemble de cas, il leur faut dans chaque cas faire confiance à l'information dynamique. Alors l'économie du système consiste à répartir les gains et les pertes entre les usagers informés, pour que chacun soit exposé au total à un gain net, même s'il subit de temps à autre une perte par rapport à l'itinéraire optimal (qu'il connaîtrait si le système d'information dynamique était neutre mais qu'il ne peut connaître par ses propres moyens).

Au total, les conditions d'acceptabilité d'une stratégie d'information sont que :

- Pour l'opérateur du réseau : la stratégie d'information, tout comme la diffusion de l'information (notamment l'augmentation du taux d'équipement), doivent contribuer à améliorer la performance du système.

- Pour la classe non informée, l'information statique ne doit pas lui causer de perte.
- A la classe informée, l'information dynamique doit procurer un certain gain par rapport à la classe non informée.
- Un usager équipé doit retirer un gain net en se fiant à l'information dynamique.

### **7.8.2. Les indicateurs économiques, interprétation liée à la gestion du trafic**

Nous avons considéré deux types d'indicateurs économiques : d'une part des coûts objectifs moyens par déplacement, pour l'ensemble des usagers ou par classe ; d'autre part des gains liés à l'équipement en information dynamique d'un usager, gain privé ou gain pour la collectivité.

Voici les indicateurs de coût moyen, définis à partir des coûts objectifs par route, par occurrence et par classe :

- Le coût moyen par usager pour l'ensemble du système est le coût moyen par déplacement qu'un usager subit sur l'ensemble des occurrences. Il représente la performance à long terme du système.
- le coût moyen par classe, respectivement informée ou non, est le coût moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers de cette classe et sur l'ensemble des occurrences. Il mesure la performance objective du système à long terme pour un usager de la classe.

Concernant les indicateurs de gain :

- Le gain privé est le profit que retirerait un individu en passant de l'état non informé à l'état informé : il est donc défini comme l'écart entre le coût moyen de la classe non informée et le coût moyen de la classe informée.
- Le gain social est le profit que la collectivité retire quand un individu change d'état d'information. Cet indicateur est étroitement lié à la gestion de l'information et à son taux de diffusion : est-il utile collectivement que le taux d'équipement augmente ? La réponse dépend de la stratégie d'information, comme nous le montrerons.

Nos simulations numériques ont porté sur deux réseaux stylisés :

- (i) NET1 "Autoroute versus artère urbaine" dans lequel la route 1 domine la route 2 en capacité et en temps libre, avec pour paramètres :  $\alpha_1 = 40$ ,  $\gamma_1 = 1$  et  $\alpha_2 = 80$ ,  $\gamma_2 = 2$ .

1. NET2 "Deux rues" dans lequel chaque route dispose d'un avantage soit en capacité soit en temps libre, avec pour paramètres :  $\alpha_1 = 40$ ,  $\gamma_1 = 2$  et  $\alpha_2 = 80$ ,  $\gamma_2 = 1$ .

Les perturbations aléatoires par arc sont indépendantes, gaussiennes, centrées de variance  $\sigma^2/2$  avec  $\sigma = 40$ . Le taux d'équipement  $\beta$  est varié de 0% à 100% par incrément de 1%.

Nous avons considéré deux volumes de demande : volume faible  $Q=10$  en lequel le réseau est peu congestionné ; et volume fort  $Q=100$  en lequel le réseau est très congestionné.

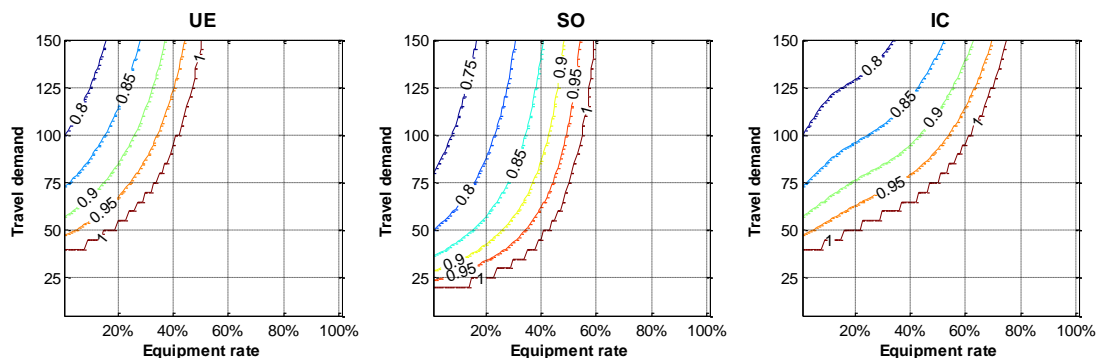


Fig. 7-6 : Net1, Taux d'affectation des usagers non-informés sur l'arc 1 sous (a) UE, (b) SO, (c) IC

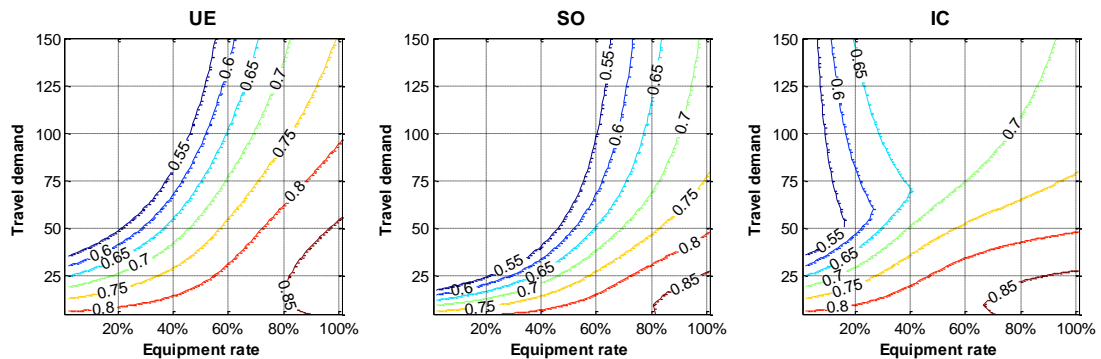


Fig. 7-7 : Taux d'affectation des usagers informés sur l'arc 1 sous (a) UE, (b) SO, (c) IC

### 7.8.3. Simulation numérique : coûts moyens d'ensemble

Chacun des graphiques suivants illustre une série de simulations, en fonction du taux d'équipement et donc de l'importance respective des deux classes. Les états du système associés à une certaine stratégie d'information, donc de manière équivalente à un certain motif de comportement coopératif entre les usagers, sont décrits sous la forme d'une courbe :

- UE pour Equilibre (égoïste) de l'utilisateur, courbe noire,
- SO pour System Optimum, courbe rouge,

- IC pour la stratégie de coopération parmi les usagers informés, courbe bleue.

Pour les deux réseaux sous une demande faible, nous constatons que sous chacune des trois stratégies le coût moyen décroît avec la diffusion de l'information dynamique (Fig. 7–8).

Mais sous une demande forte, le coût moyen ne décroît régulièrement que dans la stratégie SO, l'essentiel des gains étant accompli assez tôt.

Sous la stratégie neutre UE le coût moyen baisse puis augmente.

Tandis que la stratégie intermédiaire IC est décroissante mais avec un long pallier intermédiaire (Fig. 7–9) : les gains sont engrangés en deux temps.

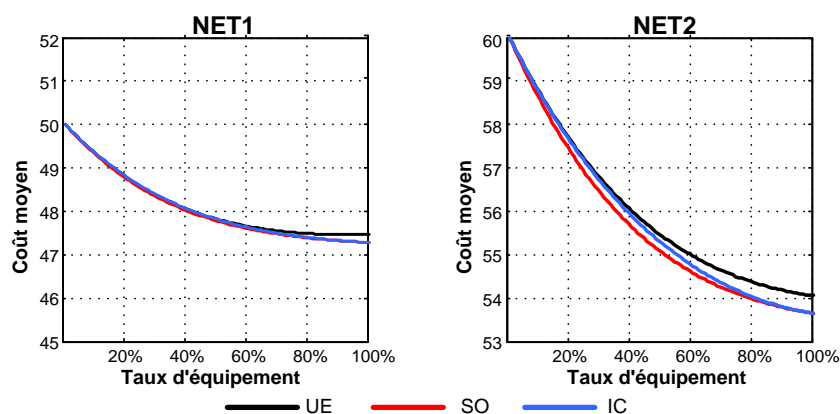


Fig. 7–8 : Coût moyen par usager selon la stratégie d'information, demande faible Q=10

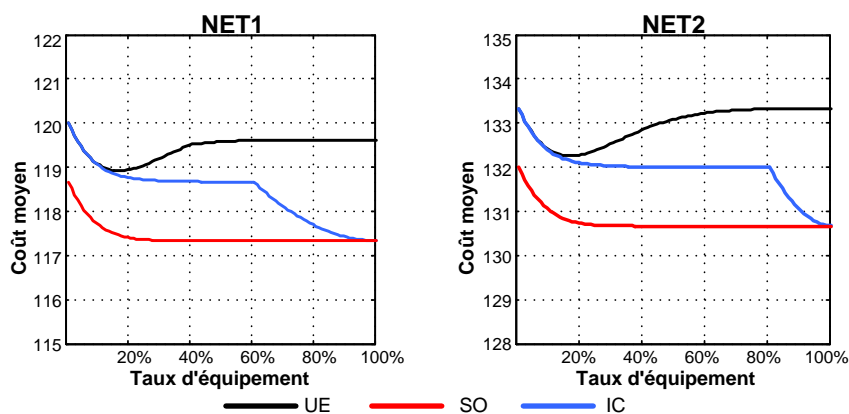


Fig. 7–9 : Coût moyen par usager selon la stratégie d'information, demande forte Q=100

#### 7.8.4.Simulation numérique : coûts moyens par classe

Nous avons porté sur les graphiques un coût moyen de référence, le coût du modèle sans information ni coopération. Chaque figure groupe trois diagrammes correspondant aux trois stratégies, pour un même réseau et un même volume de



demande. Sur chaque diagramme, une courbe correspond à l'ensemble des usagers ou à une classe particulière :

- Ensemble des usagers, courbe noire,
- Usagers non informés, courbe rouge,
- Usagers informés, courbe bleue.

Pour le réseau NET1 à demande faible, quelle que soit la stratégie d'information, la diffusion de l'équipement d'information dynamique est profitable aux usagers non informés mais réduit progressivement le profit par usager informé. Cependant il reste profitable d'être équipé (Fig. 7–10). Toujours à demande faible mais pour le réseau NET2, les stratégies se différencient entre d'une part la stratégie complètement coopérative SO et d'autre part les stratégies moins coopératives. Pour la stratégie SO, les deux classes d'usagers gagnent avec la diffusion de l'équipement d'information dynamique, quoique de manière réduite pour les usagers informés, qui conservent un profit clair d'être équipés. Pour les stratégies moins coopératives, les usagers non informés continuent de gagner quand le taux d'équipement augmente, mais les usagers informés y perdent chacun, bien qu'ils conservent un profit net relativement aux usagers non informés (Fig. 7–11).

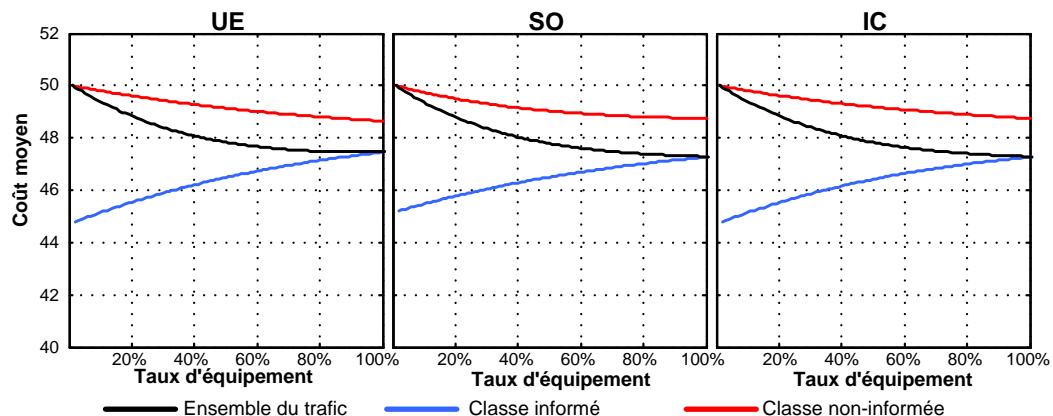


Fig. 7–10 : Coût moyen pour deux classes et pour l'ensemble du trafic sur le NET1 à Q=10

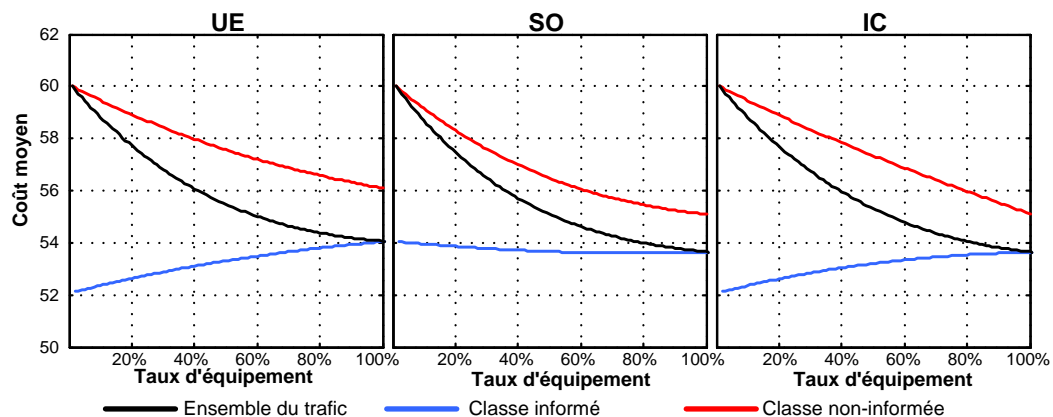


Fig. 7–11 : Coût moyen pour deux classes et pour l'ensemble du trafic sur le NET2 à Q=10

Sous un volume de demande élevé  $Q=100$ , les effets sont plus contrastés notamment pour le motif SO. Pour la stratégie neutre et le motif UE égoïste, la situation individuelle d'un usager informé se dégrade quand le taux d'équipement croît – car le gain est partagé entre plus d'individus ; de plus le profit d'être équipé devient négligeable à partir d'un taux d'équipement de 50%. La situation d'un usager non informé est quasiment inchangée (Fig. 7–12a, Fig. 7–13a).

Pour la stratégie coopérative SO, la diffusion de l'équipement induit un gain global, dont la répartition entre les classes dépend du réseau. Pour NET1 (Fig. 7–12b) ce sont les usagers non informés qui retirent le profit, éventuellement au détriment des usagers informés. Mais pour NET2 (Fig. 7–13b) ce sont les usagers informés qui captent le profit, même si leur profit individuel décroît avec la diffusion de l'équipement.

La stratégie IC de coopération parmi les informés est la plus robuste : quand tout le trafic est équipé elle procure les mêmes gains que la stratégie SO, mais le chemin d'évolution privilégie presque toujours les usagers informés qui font l'effort d'adapter leur itinéraire, sauf aux plus hautes valeurs pour lesquelles le nombre d'usagers non informés est très faible.

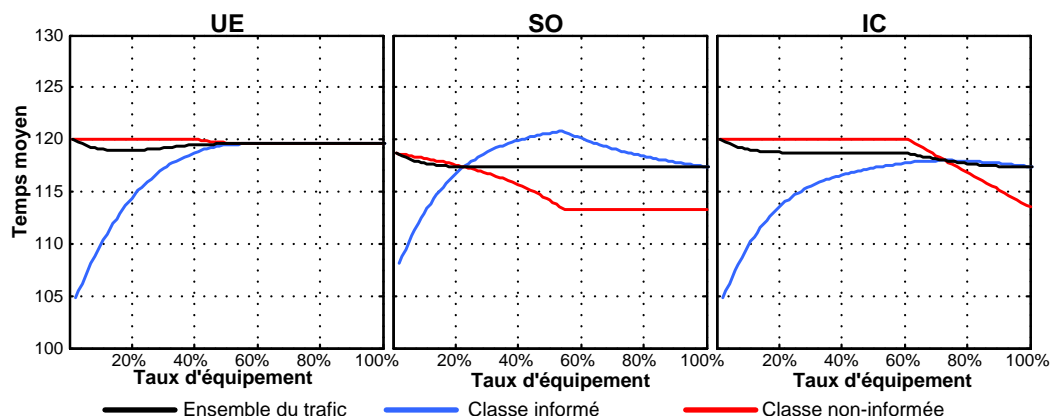


Fig. 7–12 : Coût moyen pour deux classes et pour l'ensemble du trafic sur le NET1 à  $Q=100$

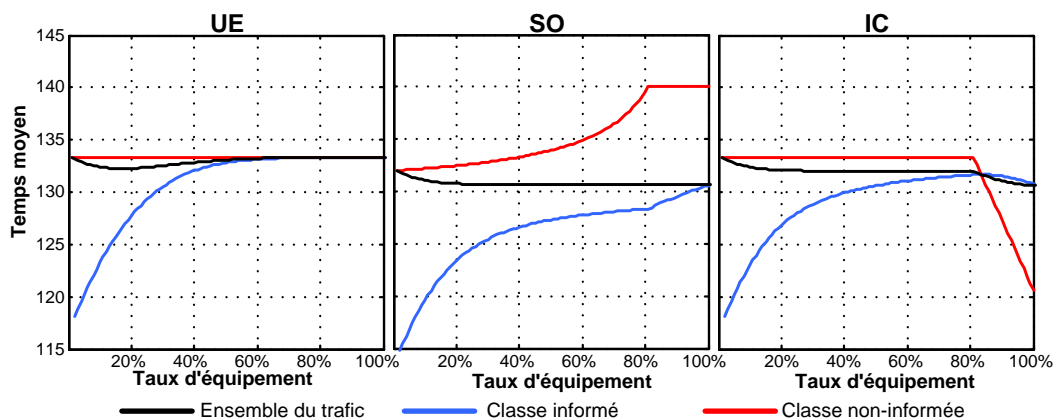


Fig. 7–13 : Coût moyen pour deux classes et pour l'ensemble du trafic sur le NET2 à  $Q=100$

### 7.8.5.Simulation numérique : gains de l'information dynamique

Nous avons porté sur les graphiques le gain collectif procuré par la diffusion de l'information dynamique à un usager marginal, ainsi que le gain privé retiré par cet usager et le gain retiré par les autres usagers. Le gain privé et le gain externe composent le gain collectif. Chaque figure groupe trois diagrammes correspondant aux trois stratégies, pour un même réseau et un même volume de demande. Sur chaque diagramme, une courbe correspond à un certain acteur impacté par l'équipement marginal :

- Ensemble des usagers, courbe noire,
- Usagers marginal, courbe bleue,
- Reste des usagers, courbe rouge.

A demande faible, sur le réseau NET1 les gains privé et social sont positifs (Fig. 7–14). L'opérateur ainsi que l'utilisateur individuel ont intérêt d'augmenter le taux d'équipement. Sur l'intervalle  $[0,40\%]$  de  $\beta$ , le gain social dépasse le gain privé, une subvention serait justifiée pour faciliter la diffusion de l'information dynamique, quelle que soit la stratégie. Les mêmes conclusions sont valides pour le réseau NET2 (Fig. 7–15).

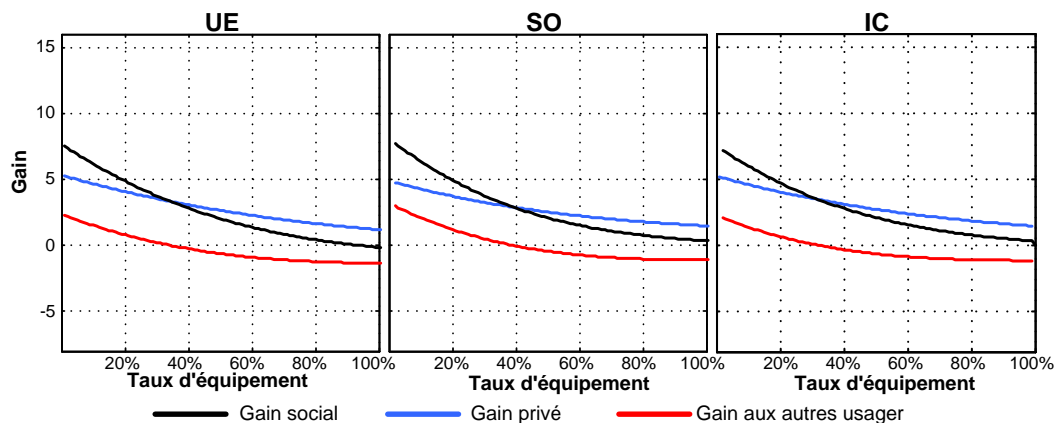


Fig. 7–14 : Gain social et gain privé de l'information sur le NET1 à  $Q=10$

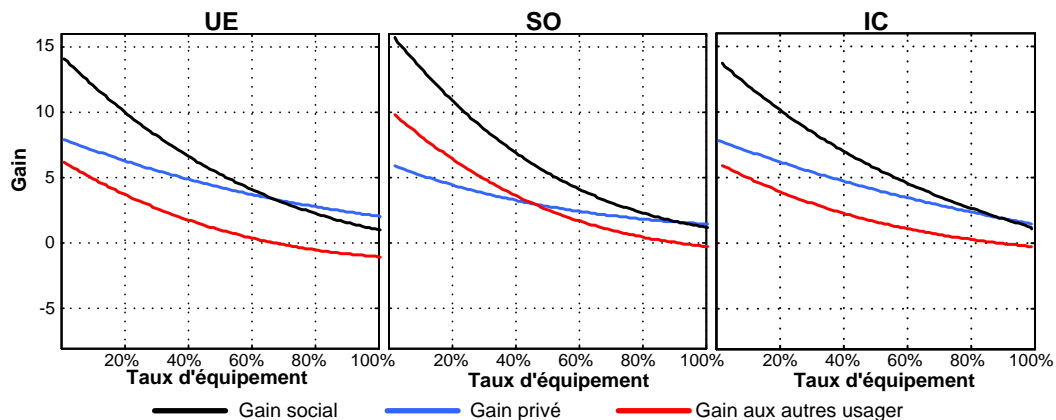


Fig. 7-15 : Gain social et gain privé de l'information sur le NET2 à Q=10

A demande élevée, les gains varient beaucoup plus irrégulièrement. Sous une stratégie d'information égoïste UE, l'utilisateur individuel retire un gain d'équipement supérieur au gain de la collectivité car la situation des autres usagers est dégradée : une compensation serait appropriée, en tarifiant l'information dynamique et en trouvant un moyen de redistribuer la recette aux usagers non informés (fig. 11a, 12a).

La stratégie SO produit des états bien différents selon le réseau considéré soumis à une demande élevée. Pour NET1 les usagers informés capturent le profit à équipement faible mais perdent à équipement fort, au contraire des usagers non informés : état difficilement acceptable par les usagers informés. Pour NET2 le gain privé est élevé mais aussi le coût externe.

Pour la stratégie IC, les résultats sont intermédiaires entre ceux de UE à équipement faible (gain privé mais coût externe) et ceux de SO à équipement élevé (perte privée et gain externe).

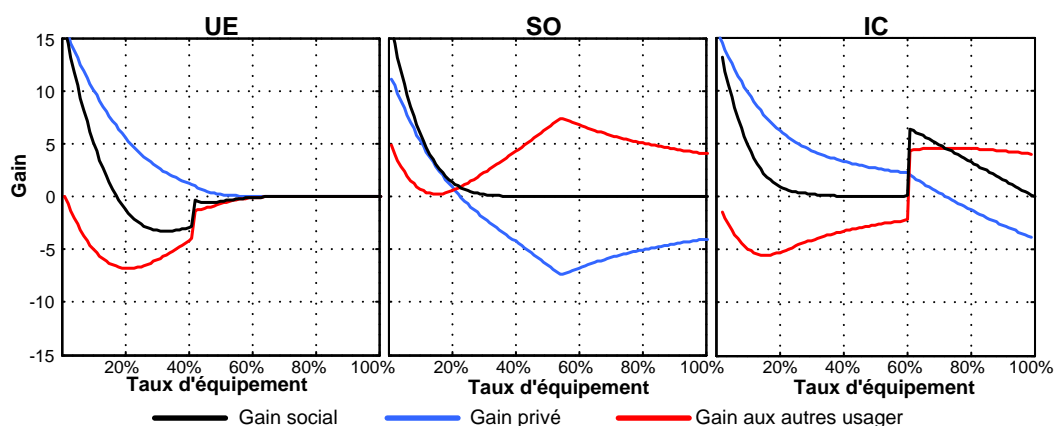


Fig. 7-16 : Gain social et gain privé de l'information sur le NET1 à Q=100

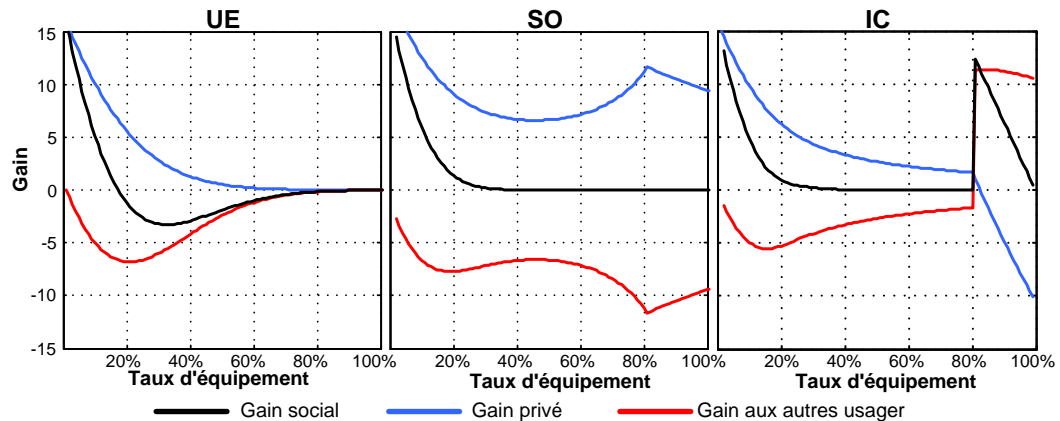


Fig. 7-17 : Gain social et gain privé de l'information sur le NET2 à Q=100

### 7.8.6. Bilan des stratégies d'information

Quand le volume de demande est faible et les temps objectifs moyens inégaux entre les itinéraires concurrents, les trois stratégies d'information UE, SO ou IC peuvent être utilisées sans susciter de problème d'acceptabilité et pour des performances sensiblement équivalentes.

A un niveau de demande élevé (réseau congestionné), la stratégie UE n'est pas recommandée car sa plage d'efficacité est bien couverte par celle de la stratégie IC qui contribue mieux à optimiser le système tout en assurant une acceptabilité équivalente.

## 7.9. CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous avons élargi le cadre de modélisation du chapitre 6, qui s'adresse seulement à l'affectation du trafic en équilibre de l'utilisateur par une adaptation aux multiples motifs de comportements coopératifs. Ce cadre de modélisation avec le système d'indicateurs nous avons permis d'analyser les stratégies d'information, en contenu ainsi qu'en niveau de diffusion.

Sur cette base, nous avons analysé trois stratégies d'information dynamique, représentées sous la forme de comportements coopératifs pour les deux classes d'utilisateurs informés ou non. Nous avons obtenu des formules analytiques pour discuter l'influence des paramètres sur les états du système soumis à une stratégie d'information soit neutre (égoïste) soit collaborative : paramètres de configuration du réseau, d'amplitude des perturbations, de volume de demande, de taux de diffusion de l'information dynamique parmi les usagers. Les expressions obtenues concernent un cas stylisé mais constituent un modèle théorique et analytique clair de l'équilibre de l'utilisateur et de l'optimum du système sur un réseau soumis à congestion, perturbation et information dynamique.

Nous avons comparé ces deux stratégies et une stratégie IC de coopération parmi les usagers informés. Sur les cas simulés, nous avons montré que la coopération entre usagers permet d'améliorer nettement l'état du système ; mais que la stratégie d'information n'est pas toujours acceptable. La stratégie IC assure un bon compromis entre efficacité (fluidité du trafic) et acceptabilité.

<p><b>Partie IV.      Gestion du trafic et information aux usagers</b></p>
--





La quatrième partie va consacrer à analyser les interactions entre la diffusion de l'information et des mesures de gestion du trafic. Les deux mesures de gestion du trafic choisies à modélisées sont la tarification de la congestion et l'allocation variable de capacité.

Pour chaque mesure de gestion du trafic étudiée, nous introduisons respectivement une variable d'action et précisons le rapport entre la variable d'action et la formation de coût par chaque classe d'utilisateur. Les deux types de stratégies seront étudiés : stratégie d'optimisation en temps différé et stratégie d'optimisation dynamique. Les effets de différentes stratégies de gestion, sous l'influence de l'information, seront comparés pour mieux tracer les effets conjoints de la gestion du trafic et l'information aux usagers.



## Chapitre 8. Tarification de la congestion et information aux usagers

---

### 8.1.INTRODUCTION

#### 8.1.1.Contexte

En ce qui concerne les causes, la congestion routière peut être classée en deux : la congestion récurrente due à un excès de demande, déterminée par les lois physiques de l'écoulement ; la congestion non-récurrente due à incidents, accidents, ou d'autres événements plus ou moins aléatoires : les conditions météorologiques défavorables, les travaux, etc. Pour lutter contre la congestion, l'opérateur routier dispose de nombreuses mesures allant de la planification de capacité en long terme, planification de l'exploitation en court terme et la gestion dynamique en court terme voire en temps réel en adaptant les feux à intersection, limitant les vitesses locales autorisées en fonction des conditions réelles du trafic. La gestion du trafic comprend également la gestion de la demande par paramétrage de qualité, de péage ou le guidage des usagers qui sont étroitement liés à l'information de trafic aux usagers.

La tarification, comme un moyen efficace à la fois pour gérer la demande et pour financer la construction, la maintenance et l'exploitation, a été largement étudié par les chercheurs en transport et en économie. Grâce à la maturité des technologies de télépéage (Electronic Road Pricing - ERP), la mise en œuvre de la tarification de la congestion est devenue de plus en plus réalisable. Aujourd'hui, le péage cordon (appelé aussi péage urbain) est déployé dans certaines zones urbaines congestionnées, par exemple à Londres, à Singapour, à Stockholm en expérimentation et à New York City en projet ; le péage forfaitaire ou variable par pas de temps est déployé sur de nombreuses autoroutes ou tronçons autoroutiers (le projet européen EUROTOLL) (OCDE, 2002) ou l'application de voies H.O.T (High Occupancy/Toll lane) aux Etats-Unis (Lemoine, 2009; Ubbels, 2009). En introduisant un péage pour influencer les comportements de choix des usagers routiers (choix de destination, de mode, d'itinéraire et d'horaire de départ), il est espéré que la demande de déplacement soit mieux répartie en temps et en espace donc le gain individuel et collectif peut être amélioré.

A priori, les services d'information dynamique du trafic pourraient offrir des avantages significatifs en termes d'amélioration de l'expérience individuelle en particulier à la congestion non-récurrente qui représente 30%-50% du volume total de retard en temps de parcours sur l'autoroute (OCDE, 1998). Néanmoins, certaines études ont démontré que, comme résultat de la sur-réaction à l'information, les effets indésirables et les externalités négatives peuvent survenir sur le système (Ben-Akiva, De Palma *et al.*, 1991), (Zhang et Verhoef,

2006) et confirmé par un de nos travaux (Leurent et Nguyen, 2010). Cela arrive parce que les usagers ne prennent pas en compte les coûts externes qu'ils produisent sur les autres lors de leur décision.

Il est important donc de traiter conjointement les deux mesures de gestion du trafic sur un système commun puisse que les services d'information aux usagers et la tarification de la congestion ont des complémentarités technologiques. En plus, un service d'information de trafic est capable de diffuser aussi de l'information concernant les tarifs qui dépendent *a priori* de l'état actuel du trafic afin que les usagers soient parfaitement conscients de leur coût de déplacement, y compris le péage.

Par conséquent, il est nécessaire d'analyser l'interaction entre les deux systèmes en raison que la tarification de la congestion peut influencer le fonctionnement du service d'information aux usagers ainsi que les bénéfices retirés de l'information de trafic et *vice-versa*.

### 8.1.2.Revue bibliographique

L'optimalité de la tarification a été largement considéré par les économistes de transport. Trois questions principales sont les suivantes : quels objectifs doivent être fixés (régime); quelles parties du réseau doivent être tarifées (configuration); quel tarif doit être appliqué pour une période donnée (calendrier de péage)

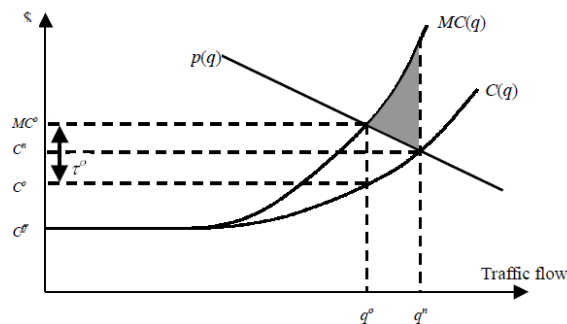


Figure 1. Optimal road pricing in a time-independent model

Fig. 8-1 : Tarification optimal. Source : (Lindsey et Verhoef, 2000)

Le fondateur de la tarification optimale est Vickrey qui a introduit premièrement le principe : « les péages doivent refléter de manière plus proche possible le coût social marginal de chaque déplacement en termes d'impacts sur d'autrui » (Vickrey, 1967). L'optimum du système peut être obtenu si sur chaque arc, chaque usager routier est tarifé tel que son coût s'élève au coût social marginal (first-best)

Car l'implantation du péage sur toutes les sections de route est difficilement faisable, voire impossible, un certain nombre de travaux ont investi sur les questions où et comment le péage peut être implanté sur certaines parties prédéfinies d'un réseau routier (second-best). Dans l'approche de simulation statique, les contributions les plus complètes sur la « second-best » devrait être (Vany et Saving, 1980), (Verhoef, Nijkamp *et al.*, 1996), (de Palma et Lindsey, 2000), (Verhoef, 2002)a, (Verhoef, 2002)b and (Zhang et Verhoef, 2006) entre autres.

En ce qui concerne la simulation dynamique, un certain nombre de travaux contribuent à la tarification optimale pour le cas où le tarif de péage varie par pas de temps (third-best) ou le tarif de péage est destiné à maintenir la fluidité du trafic (de Palma, Kilani *et al.*, 2005) (de Palma, Lindsey *et al.*, 2008), (Yang et Huang, 2004)

En dépit des nombreux travaux traitant séparément les impacts de l'information de trafic ou la tarification de la congestion", il y en a eu peu de contribution sur l'interaction entre les deux mesures. Citons néanmoins les travaux de (Verhoef, Emmerink *et al.*, 1996), (De Palma et Lindsey, 1998), (Yang, 1999), (Zhang et Verhoef, 2006) pour souligner que ils ne prennent pas de considération en perturbations exogènes – la raison pour la quelle les services d'information dynamique de trafic ont été développés.

Récemment, (Enrique Fernández L., de Cea Ch *et al.*, 2009) a tenté d'analyser les effets conjoints de l'information de trafic et de la tarification à congestion en présence de perturbations exogènes de trafic. Toutefois, la représentation des perturbations dans ce cadre de modélisation est limitée à un ensemble de quatre configurations.

### **8.1.3.Objectif**

Dans des chapitres précédents (cf. chapitre 6 et chapitre 7), les interactions entre la congestion non-récurrente, la congestion récurrente et l'information dynamique de trafic aux usagers ont été explicitement modélisées en segmentant la demande en deux classes d'usagers, informée ou non-informée : les usagers informés ont de l'information dynamique sur les conditions actuelles (auxquelles ils sont confrontés) des temps de parcours ; pendant que les usagers non-informés connaissent seulement les temps de parcours moyens. Il s'agit d'un modèle novateur car il distingue deux niveaux d'équilibre du trafic associés à deux échelles de temps et à la perception et au comportement des usagers : la couche supérieure reflète la décision de court terme par les usagers informés, par opposition à la couche inférieure reflète la décision de long terme par les usagers non-informés dynamiquement, chaque couche pose des contraintes sur l'autre.

L'objectif principal de ce chapitre est de développer une extension de la modèle de base, en intégrant de différentes stratégies de tarification. Le modèle étendu devra permettre d'analyser les impacts de l'information dynamique sur le trafic et la tarification de la congestion et de séparer les effets individuels et ceux conjoints données par les deux mesures de gestion du trafic. Plutôt que d'essayer de quantifier les coûts et les bénéfices d'un système particulier, notre accent est mis sur une hypothèse fondamentale qui a été encore mal-modélisée dans l'évaluation des systèmes d'information dynamique de trafic : à savoir, la structure probabiliste des perturbations.

#### **8.1.4.Méthode**

Notre philosophie, à travers un certain nombre de travaux sur ce sujet, est explicite et assez réalistes à ces égards, encore plus simple possible sans dénaturer les caractéristiques physiques et comportementales. Notre modèle pose des hypothèses explicites à propos de: (i) le réseau, (ii) les conditions de trafic soumises à des phénomènes de congestion, (iii) la distribution statistique des perturbations, (iv) structure de la demande consistant en volume, classes d'utilisateurs (informée ou non-informée), le taux d'équipement. L'équipement individuel en information dynamique de trafic permet à l'utilisateur de connaître les coûts effectifs de déplacement, y compris les perturbations pendant que les utilisateurs non-équipés ne perçoivent que des valeurs moyennes de coût grâce à son expérience capitalisée lors de ses voyages.

En suite, le jeu d'hypothèses sera adapté à divers stratégie de tarification, en particulier la stratégie « tarif fixe » dans laquelle le tarif est fixé pour toutes les circonstances et la stratégie « tarif dynamique » dans laquelle le tarif optimal est conçu et adapté à la circonstance. La combinaison des trois options de péage (sans péage, péage avec tarif fixe et péage avec tarif dynamique) et deux options de diffusion de l'information dynamique (sans ou avec information dynamique) fait une série de six plans de gestion du trafic à comparer.

Le modèle est appliqué à un réseau stylisé de deux arcs en parallèle avec deux classes d'utilisateurs, respectivement informée ou non-informée, afin de simuler la réaction aux perturbations des utilisateurs et la congestion des plans de gestion du trafic et d'évaluer les bénéfices des mesures de gestion du trafic.

#### **8.1.5.Contenu du chapitre**

La section §8.1 établira un jeu d'hypothèses de modélisation en rappelant des principales hypothèses et y ajoutant une composante de péage, y compris les variable et les stratégies de péage, au modèle de base présenté au chapitre 6. Ce jeu d'hypothèses va nous amener à divers problème d'équilibre du trafic qui dépendent de la stratégie de péage spécifiée. Puisque que le problème d'affectation est le même que celui du modèle de base sans péage, la section

§8.3 rappellera les principales étapes de l'analyse de l'équilibre qui finissent par quelques formules analytiques. La section §8.4 commence par définir le tarif fixe qui est moyennement optimal pour l'ensemble des occurrences, et tente ensuite de convertir le nouveau problème d'affectation en celui classique (sans péage) résolu précédemment. Dans la même logique, la section §8.5 commence par définir la tarification dynamique optimale. En fait, le problème d'affectation du trafic en équilibre avec la tarification dynamique est identique à celui de l'optimum du système, qui est résolu dans le Chapitre 7. Les analyses effectuées dans en §8.3, §8.4, §8.5 nous permet de mener certaines comparaisons analytiques ainsi que investigations numériques dans la section §8.6.

## 8.2.FORMULATION DES HYPOTHESES

Le modèle sera présenté à travers son jeu d'hypothèses qui reflète respectivement à : (i) le côté offre du réseau : les itinéraires, les effets de congestion, les perturbations aléatoires ; (ii) les différentes stratégies de tarification ; (iii) le côté demande des usagers informés ou non-informés en information dynamique de trafic ; (iv) les interactions entre l'offre, la demande, la tarification et l'information du trafic

### 8.2.1.L'offre de transport

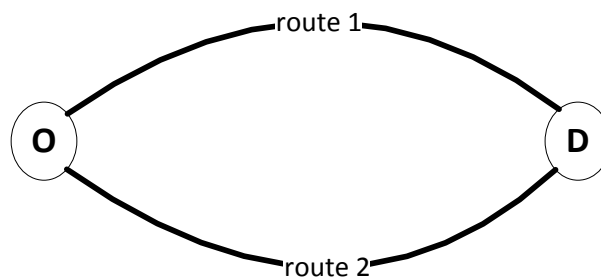


Fig. 8-2 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination

Considérons un réseau de transport se composant de deux arcs  $a \in A$ , l'ensemble des arcs, avec nœuds  $n \in N$ , l'ensemble des nœuds. Notre application sera limitée à un cas d'école, un réseau stylisé de deux arcs en parallèle reliant une origine et une destination, figuré en Fig. 8-2: donc  $a \in \{1,2\}$

Sur chaque arc  $a$  du réseau, le débit  $x_a$  induit un temps de parcours individuel  $T_a$  qui est soumis à des effets de congestion par la base de la fonction temps de parcours-débit  $T_a = \tilde{t}_a(x_a)$ , une fonction croissante du débit en arc. Pour l'instance, nous prenons une fonction affine linéaire comme suivante :  $\tilde{t}_a(x_a) = \alpha_a + \gamma_a x_a$  dans laquelle  $\alpha_a$  est temps de parcours à vide et  $\gamma_a$  la sensibilité du temps de parcours individuel au débit (Fig. 8-3). Cette hypothèse

est convenable à un état du trafic sans fil d'attente (peu saturé), pas à un état saturé dans lequel le débit est limité par la capacité d'écoulement.

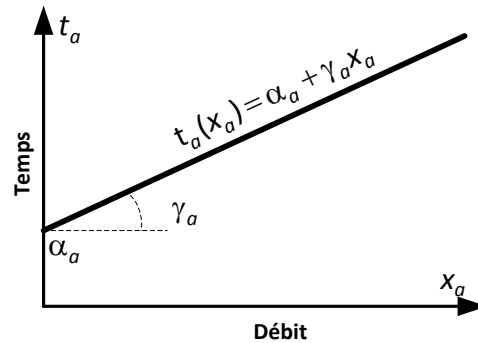


Fig. 8–3 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps

En dépit de notre modèle d'écoulement qui est essentiellement stationnaire, on doit tenir en compte les effets dynamiques inter-période, autrement dit la variabilité inter-période à être modélisée par une variable aléatoire (). A cette fin, nous supposons qu'il existe un ensemble  $\Omega$  des circonstances  $\omega$  (ou périodes), dont chacune correspond à des débits en arc  $x_{a\omega}$  et temps de parcours sur arc :

$$T_{a\omega} = \tilde{t}_a(x_{a\omega}) + \zeta_a(\omega) \quad (\text{eq. 8-1})$$

La variable aléatoire  $\zeta_a(\omega)$  modélise la variation éventuelle du temps de parcours qui paraît due à perturbations exogènes. Cette variable aléatoire est supposée d'avoir variance  $\sigma_a^2$  et moyenne nulle (Fig. 8–4). Pour simplicité, nous supposons que les variables  $\zeta_a(\omega)$  (de deux arcs) sont indépendamment distribuées.

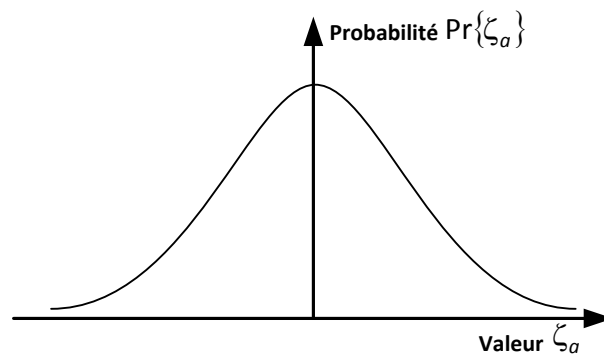


Fig. 8–4 : Distribution gaussienne des perturbations

Nous avons la formule du temps de parcours moyen sur l'ensemble des occurrences :



$$E_{\omega}[T_a : x_{a\omega} = x] = \tilde{t}_a(x) \quad (\text{eq. 8-2})$$

### 8.2.2. Les stratégies de tarification

A chaque occurrence  $\omega$ , sur l'arc  $a$ , un tarif de péage  $p_{a\omega}$  (pour simplicité,  $p_{a\omega}$  est supposé d'être convertie en unité de temps) calculé par l'opérateur du réseau en fonction des conditions du trafic sous une des stratégies suivantes :

**Stratégie « sans tarification »**, dénotée NT<sup>1</sup> : le tarif de péage  $p_{a\omega}$  sur l'arc  $a$  est appliqué à 0 (nulle) pour toutes les occurrences.

**Stratégie « tarification fixe »**, dénotée FT<sup>2</sup> : le tarif de péage  $p_{a\omega}$  ne dépend pas de l'occurrence  $\omega$  :  $p_{a\omega} = \bar{p}_a \forall \omega$ . La valeur de  $\bar{p}_a$  est appliqué afin de maximiser le bien-être social moyen sur l'ensemble des occurrences  $\omega$ .

**Stratégie « tarification variable »**, dénotée DT<sup>3</sup> :  $p_{a\omega}$  est variable dépendante de l'occurrence  $\omega$ . A chaque occurrence  $\omega$ ,  $p_{a\omega}$  est calculé afin de maximiser le bien-être social à cette occurrence.

### 8.2.3. La demande

Analysons les déplacements dans le réseau par paire origine destination (OD), ex. du nœud O à nœud D, présenté dans la Fig. 1. Les déplacements sont réalisés pour une paire O-D par une population des usagers qui se tombent dans une des deux classes suivantes : classe *I* des usagers équipés qui ont un équipement pour recevoir de l'information dynamique ; ou la classe *N* des usagers non-équipés qui ne reçoivent pas d'information dynamique

Les usagers sont supposés d'être homogènes en valeur du temps et de choisir leur itinéraire d'une origine à une destination sous certain comportement rationnel de minimisation de coût, sous les contraintes de leur connaissance sur les coûts.

Un usager informé est supposé de recevoir une connaissance parfaite de l'information dynamique, y compris les temps de parcours et les tarifs de péage, quelle que soit la circonstance :

---

<sup>1</sup> No Tolling

<sup>2</sup> Flat Tolling

<sup>3</sup> Dynamic Tolling

$$c_a^I(\omega) = C_{a\omega} = T_{a\omega} + p_{a\omega} \quad (\text{eq. 8-3})$$

Pendant qu'un usager non-informé est supposé de disposer une connaissance grossière sur les valeurs moyennes, c'est-à-dire les temps de parcours moyens et les tarifs de péage moyens :

$$c_a^N = E_{\omega}[T_{a\omega} + p_{a\omega}] = E_{\omega}[C_{a\omega}] = \bar{C}_a \quad (\text{eq. 8-4})$$

Ici, le coût ressenti par un usager pour un déplacement est réduit au temps de parcours, plus le coût de péage en équivalence de l'unité de temps en négligeant tous les autres critères, tel que le confort afin de se focaliser sur l'analyse les perturbations qui font l'objet principal de notre étude.

Dénotons  $Q = x_1 + x_2$ , le volume de demande non-élastique, supposé constant quelle que soit la circonstance.  $\beta = q^I / Q$  représente le taux d'équipement, autrement dit le ratio du nombre des usagers informé  $q^I$  par rapport le volume total  $Q$  et  $q^N = Q - q^I$  le nombre d'usagers non-équipés.

En arc  $a$  et classe d'usagers  $u \in \{I, N\}$ ,  $x_a^u(\omega)$  dénote le débit sur l'arc, il satisfait que :

$$\begin{cases} x_a(\omega) = x_a^I(\omega) + x_a^N(\omega) \\ x_1^I(\omega) + x_2^I(\omega) = q^I \\ x_1^N(\omega) + x_2^N(\omega) = q^N \end{cases} \quad (\text{eq. 8-5})$$

#### 8.2.4. L'équilibre offre-demande

Châignons les hypothèses concernant l'offre de la demande par les précisions suivantes :

- A chaque occurrence  $\omega$ , chaque usager choisit son itinéraire : son déplacement sur ce itinéraire induit un incrément de débit.
- Considérant une population des usagers, leur choix individuel induit les débits en arc sur le réseau.
- Les débits en arc déterminent les temps de parcours sur les itinéraires à la base des fonctions débit-temps de congestion.
- Les temps de parcours, avec les perturbations exogènes, déterminent les choix des usagers.

Tout cela induit un enchaînement cyclique des interactions entre l'offre et la demande. La Fig. 3 présente des explications plus précises en abordant de chaque classe d'usagers d'une spécifique manière : la classe d'usagers  $I$  réagit à

chaque occurrence  $\omega$  en adaptant son choix d'itinéraire au contexte dynamique – qui conduit au débit informé  $x_a^I(\omega)$  qui varie en fonction de  $\omega$  en court terme ; tandis que la classe d'utilisateur  $N$  ne effectue son choix d'itinéraire que pour long terme sur la base des coûts moyens sur la distribution  $\Omega$  des occurrences  $\omega$ , conduit au débit non-informé  $\bar{x}_a^N$  qui ne varie pas en fonction de  $\omega$ . Le tarif de péage  $p_{a\omega}$  est calculé en fonction des conditions du trafic, sous la stratégie de tarification choisie.

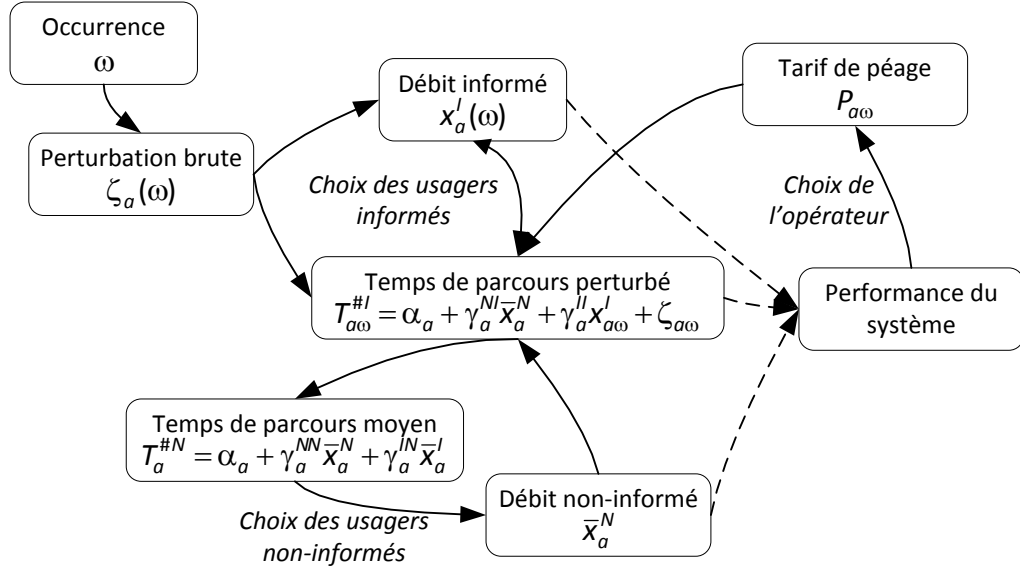


Fig. 8-5 : Dépendances logiques dans le modèle

### 8.2.5. Indicateurs de congestion

Deux indicateurs économiques sont choisis pour l'analyse (i) le bénéfice individuel qu'un usager de la route dérive d'un dispositif individuel d'information de trafic et (ii) le bénéfice social de l'ensemble du système, y compris de l'information dynamique de trafic et la tarification de la congestion..

#### Gain individuel d'être équipé

Le gain individuel d'être équipé est mesuré par l'écart entre le coût moyen d'un déplacement non-informé  $\bar{C}^N$  et celui d'un déplacement informé  $\bar{C}^I$ .

$$\Gamma^P = \bar{C}^N - \bar{C}^I \quad (\text{eq. 8-6})$$

, dans laquelle  $P$  dénote la stratégie de tarification spécifiée pour l'analyse.

Pour un usagers non-informé, le coût moyen est suivant (car l'affectation des débits non-informés ne dépend pas de  $\omega$ ) :

$$\bar{C}^N = c_1^N \frac{x_1^N}{q^N} + c_2^N \frac{x_2^N}{q^N} \quad (\text{eq. 8-7})$$

Pour un usager informé, le coût moyen se déduit par l'agrégation de toutes les occurrences :

$$\bar{C}^I = \int_{\omega} (x'_{1\omega} C_{1\omega} + x'_{2\omega} C_{2\omega}) d\omega \quad (\text{eq. 8-8})$$

### Temps de parcours moyen subi par les usagers pour un déplacement

Le bien-être social de l'ensemble de trafic peut être représenté par le temps de parcours moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers du réseau. Ce temps de parcours moyen résulte de l'agrégation de tous les temps de parcours perturbés

$$T^P = \int_{\omega} (x_{1\omega} T_{1\omega} + x_{2\omega} T_{2\omega}) d\omega \quad (\text{eq. 8-9})$$

Notons que cet indicateur ne inclut pas de péage, car le péage, qui se transfère des usagers à l'opérateur du réseau, n'est pas un coût social.

## 8.3. STRATEGIE « SANS TARIFICATION »

Sous la stratégie « sans tarification », le problème d'affectation du trafic reste celui de l'équilibre de l'utilisateur, dénoté UE, qui est traité dans le Chapitre 6. Cette section ne présente que les principales étapes de l'analyse de l'équilibre qui suivent la structure logique figurée en Fig. 3. Nous allons d'abord nous focaliser sur l'affectation de la classe informée en supposant que l'affectation de la classe non-informée est donnée. L'affectation moyenne de la classe informée (§8.3.2) sera agrégée à partir des celles de toutes les occurrences  $\omega$  (§8.3.1). Puis, la classe non-informée sera affectée conditionnellement à la classe informée (§8.3.3). Ensuite, le cycle d'affectations fera l'équilibre bi-niveau comme un problème de point fixe (§8.3.4). Enfin, deux indicateurs économiques seront proposés pour analyser les effets de la dynamique d'information et de tarification de la congestion sur le réseau (§8.3.5).

### 8.3.1. Affectation instantanée de la classe informée

Notons  $\alpha'_a = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^N$  puis  $T_{a\omega} = \alpha'_a + \gamma_a x'_a(\omega) + \zeta_{a\omega}$  le temps de parcours perturbé sur l'arc  $a$  à occurrence  $\omega$ . Si il y avait qu'un usager informé, il devrait choisir la route de minimum  $T_{a\omega}(0) = \alpha'_a + \zeta_{a\omega}$ . Cependant la réaffectation dynamique des usagers informés tentera à augmenter le temps de parcours sur cette route du à sa fonction débit/temps (fonction de congestion) : cet effet

conduit à une compensation partielle, i.e.  $T_{a\omega}$  reste inférieur à  $T_{b\omega}$  ou une compensation totale, i.e.

$$\alpha'_a + \gamma_a x'_a(\omega) + \zeta_{a\omega} = \alpha'_b + \gamma_b x'_b(\omega) + \zeta_{b\omega} \quad (\text{eq. 8-10})$$

Pour le cas dernier, comme  $x'_a(\omega) + x'_b(\omega) = q'$ , nous avons :

$$x'_a(\omega) = \frac{\gamma_b q' + \alpha'_b + \zeta_b - \alpha'_a - \zeta_a}{\gamma_a + \gamma_b} \quad (\text{eq. 8-11})$$

$$T_{a\omega} = \frac{\gamma_a \gamma_b q' + \gamma_a \alpha'_b + \gamma_b \alpha'_a}{\gamma_a + \gamma_b} + \frac{\gamma_b \zeta_a + \gamma_a \zeta_b}{\gamma_a + \gamma_b} \quad (\text{eq. 8-12})$$

Pour le cas précédent,  $x'_{a\omega} = q'$  et  $x'_{b\omega} = 0$  puis  $T_{a\omega} = \alpha'_a + \gamma_a q' + \zeta_{a\omega}$  et  $T_{b\omega} = \alpha'_b + \zeta_{b\omega}$  avec  $T_{a\omega} \leq T_{b\omega}$  donc :

$$\zeta_{b\omega} - \zeta_{a\omega} \geq \alpha'_a - \alpha'_b + \gamma_a q' \quad (\text{eq. 8-13})$$

### 8.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne de la classe informée

Notons  $B \equiv \alpha'_1 - \alpha'_2 + \gamma_1 q'$  et  $A \equiv \alpha'_1 - \alpha'_2 - \gamma_2 q'$  : conditionnellement à  $z = \zeta_2 - \zeta_1$ , nous avons :

- Si  $z > B$  alors  $T_{1\omega}(q') \leq T_{2\omega}(0)$  puis  $x'_1(\omega) = q'$  et  $x'_2(\omega) = 0$
- Si  $z < A$  alors  $T_{1\omega}(0) \geq T_{2\omega}(q')$  puis  $x'_1(\omega) = 0$  and  $x'_2(\omega) = 0$
- Si  $z \in [A, B]$  alors  $T_{1\omega} = T_{2\omega}$  aux débits  $x'_1(\omega) = \frac{z - A}{\gamma_1 + \gamma_2}$  et  $x'_2(\omega) = \frac{B - z}{\gamma_1 + \gamma_2}$

Notons  $F$  la fonction de distribution de la variable aléatoire  $Z = \zeta_2 - \zeta_1$  sur l'ensemble  $\Omega$  des occurrences  $\omega$ , et  $\tilde{F}$  fonction de moment tronqué  $\tilde{F}(x) = \int_{-\infty}^x z dF(z)$ , par agrégation, nous avons :

$$\bar{x}'_1 = 0 \cdot \int_{-\infty}^A dF(z) + \int_A^B \frac{z - A}{\gamma_1 + \gamma_2} dF(z) + q' \cdot \int_B^{+\infty} dF(z) = q' - \bar{x}'_2 \quad (\text{eq. 8-14})$$

, dans laquelle :

$$\bar{x}_2^I = \frac{G(B) - G(A)}{\gamma_1 + \gamma_2} \text{ où } G(x) \equiv xF(x) - \tilde{F}(x) \quad (\text{eq. 8-15})$$

L'indépendance des variables  $\zeta_1$  et  $\zeta_2$  fait que  $Z$  soit aléatoirement distribuée avec moyenne  $\mu = \mu_2 - \mu_1 = 0$  et variance  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$

### 8.3.3. Affectation de la classe non-informée

Notons  $\alpha_a^N \equiv \alpha_a + \mu_a + \gamma_a \bar{x}_a^I$  et comparer  $\alpha_1^N$  à  $\alpha_2^N$  :

- Si  $\alpha_1^N \geq \alpha_2^N + \gamma_2 q^N$  alors  $\bar{x}_2^N = q^N$  et  $\bar{x}_1^N = 0$
- Si  $\alpha_1^N + \gamma_1 q^N \leq \alpha_2^N$  alors  $\bar{x}_1^N = q^N$  et  $\bar{x}_2^N = 0$
- Si  $-\gamma_1 q^N \leq \alpha_2^N - \alpha_1^N \leq \gamma_2 q^N$  alors  $\bar{x}_a^N = \frac{\alpha_b^N - \alpha_a^N + \gamma_b q^N}{\gamma_a + \gamma_b}$

La dernière condition déduit de  $\bar{t}_a = \bar{t}_b = \theta$  avec  $\bar{t}_a = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^I + \gamma_a \bar{x}_a^N$ , où l'affectation des usagers non-informés sur les routes de coût minimal soumises à

### 8.3.4. Caractérisation du point fixe de l'équilibre offre-demande

Reliant les formules précédentes, nous obtenons que le débit non-informé ( $\bar{x}_a^N$ ) induit le temps de parcours de référence pour la classe informée ( $\alpha_a^I$ ), qui à leur tour détermine le débit moyen des usagers équipés ( $\bar{x}_a^I$ ), qui à leur tours détermine le temps de parcours de référence pour la classe non-informée ( $\alpha_a^N$ ), qui à leur tour détermine les débits des usagers non-équipés ( $\bar{x}_a^N$ ). Ce cycle spécifie que chaque variable de l'ensemble ( $\bar{x}_a^N$ ), ( $\bar{x}_a^I$ ), ( $\alpha_a^I$ ), ( $\alpha_a^N$ ) résout un problème spécifique de point fixe. Pour le cas de deux routes parallèles, ce type de problème est facile à résoudre car il ne porte que sur une inconnue réelle, un algorithme de relaxation sera approprié, par exemple un algorithme de combinaison convexe sur les flux non-informés.

### 8.3.5. Résultats analytiques pour le cas des coûts moyens égaux

Concernant le cas d'égalité des coûts moyens (le cas le plus répandu, cf. chapitre 6), les indicateurs peuvent être formulés analytiquement :

- Le gain individuel d'être équipé :

$$\Gamma_{NT} = G(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q) \quad (\text{eq. 8-16})$$

, dans laquelle :  $\gamma$  est le somme des paramètres de sensibilité à la congestion sur les deux routes :  $\gamma \equiv \gamma_1 + \gamma_2$ .

- Le temps de parcours moyen par déplacement subi par l'ensemble des usagers s'élève à :

$$\bar{T}_{NT} = \theta - \beta \cdot G(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q) \quad (\text{eq. 8-17})$$

, dans laquelle :  $\theta \equiv \frac{\gamma_1 \gamma_2 Q + \alpha_1 \gamma_2 + \alpha_2 \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$

#### 8.4. STRATEGIE « TARIFICATION FIXE »

##### 8.4.1. Tarif fixe (de péage) optimal

Sous la stratégie « tarification fixe », dénoté FT, les tarifs de péage sont fixés par rapport à  $\omega$  :  $p_{a\omega} = \bar{p}_a \forall \omega$ .  $\bar{p}_a$  est fixé afin de minimiser le temps de parcours moyen par déplacement :

$$\min_{\bar{p}_a} [\bar{T}_{FT}(\bar{p}_a)] \quad (\text{eq. 8-18})$$

$\bar{p}_a$  sera calculé dans la procédure de l'affectation du trafic (section §4.2) où  $\bar{T}_{FT}$  est explicitement formulé.

##### 8.4.2. Affectation du trafic

En supposant que  $\bar{p}_a$  est donné, nous allons chercher une solution au problème d'affectation du trafic. Une fois que l'affectation du trafic et les indicateurs seront formulés, le temps de parcours moyen par déplacement  $\bar{T}_{FT}$  peut être utilisé comme fonction d'objectif pour déterminer  $\bar{p}_a$

A un  $\bar{p}_a$  donné, le fonction de coût de déplacement devient :

$$C_{a\omega} = T_{a\omega} + p_{a\omega} = \alpha_a + \bar{p}_a + \gamma_a x_{a\omega} \quad (\text{eq. 8-19})$$

Notons  $\alpha_a^* = \alpha_a + \bar{p}_a$ , la formule peut être réécrite comme :

$$C_{a(\omega)} = \alpha_a^* + \gamma_a x_{a(\omega)} \quad (\text{eq. 8-20})$$

Le problème d'affectation du trafic dans ce cas devient celui traditionnel comme dans la section §8.3 où la demande du volume  $Q$  et du taux d'équipement  $\beta$  est affectée sur un réseau avec le jeu de paramètres  $\alpha_a^*, \gamma_a$  (au lieu de  $\alpha_a, \gamma_a$ ).

### 8.4.3. Résultats analytiques pour le cas des coûts moyens égaux

Pour le cas d'égalité des coûts moyens, les indicateurs peuvent être formulés de manière analytique comme suivant :

- Le gain individuel d'être équipé

$$\Gamma_{FT} = G\left[-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q\right] \quad (\text{eq. 8-21})$$

Le temps de parcours moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers s'élève à :

$$\bar{T}^{FT} = \theta^* - \beta \cdot G\left(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q\right) - \left[\frac{\bar{x}_1}{Q} \cdot \bar{p}_1 + \frac{\bar{x}_2}{Q} \cdot \bar{p}_2\right] \quad (\text{eq. 8-22})$$

, dans laquelle :  $\theta^* \equiv \frac{\gamma_1 \gamma_2 Q + (\alpha_1 + \bar{p}_1) \gamma_2 + (\alpha_2 + \bar{p}_2) \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$

Comme  $\bar{c}_1 = \bar{c}_2$ , la formule de  $\bar{T}_{FT}$  se réduit à :

$$\bar{T}_{FT} = \theta - \beta \cdot G\left(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q\right) + \frac{1}{\gamma Q} \Delta p (\Delta p + \Delta \alpha) \quad (\text{eq. 8-23})$$

, dans laquelle :  $\Delta \bar{p} = \bar{p}_2 - \bar{p}_1$  and  $\Delta \alpha \equiv \alpha_2 - \alpha_1$

Considérons  $\bar{T}_{FT}$  comme une fonction d'une variable unique  $\Delta \bar{p}$  :  $\Delta \bar{p}$  devrait être fixé à  $-\frac{\Delta \alpha}{2}$  pour que  $\bar{T}_{FT}$  soit minimal. Dans ce cas-là :

$$\bar{T}_{FT} = \theta - \frac{\Delta \alpha^2}{4 \cdot \gamma \cdot Q} - \beta \cdot G\left(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q\right) \quad (\text{eq. 8-24})$$

## 8.5. STRATEGIE « TARIFICATION DYNAMIQUE »

### 8.5.1. Tarif de péage dynamiquement optimal

Sous la stratégie dynamic-tolling, le tarif de péage  $p_{a(\omega)}$  est fixé afin de minimiser le temps de parcours total subi par tous les usagers à l'occurrence  $\omega$  :



$$\min_{p_{a\omega}} [x_{1\omega} T_{\omega 1} + x_{2\omega} T_{\omega 2}] \quad (\text{eq. 8-25})$$

Dans la littérature, il est bien connu que l'affectation du trafic peut attendre l'optimum du système si « *chaque usager est tarifié pour que le coût de déplacement reflète le coût social marginal en terme d'impacts sur l'autrui* », e.g. le coût de déplacement sur chaque route s'élève à :

$$C_{a\omega} = T_{a\omega} + \frac{dT_{a\omega}}{dx_{a\omega}} \quad (\text{eq. 8-26})$$

Autrement dit, le tarif de péage sur l'arc  $a$  à l'occurrence  $\omega$  devrait être fixé à :

$$p_{a\omega} = x_{a\omega} \frac{d\tilde{t}_a}{dx_{a\omega}} \quad (\text{eq. 8-27})$$

A ce stade, le problème d'affectation du trafic coïncide à celui de l'optimum du système, qui a été traité dans le chapitre 7

### 8.5.2. Affectation du trafic en optimum du système

Grâce à la linéarité de la fonction du temps de parcours, la formule (eq. 8-24) peut être réécrite comme :  $p_{a\omega} = \gamma_a \cdot x_{a\omega}$ . La fonction du coût de déplacement sur un arc devient :

$$C_{a\omega} = T_{a\omega} + p_{a\omega} = \alpha_a + 2\gamma_a x_{a\omega} + \zeta_a = \alpha_a + \gamma_a^\# x_{a\omega} + \zeta_a \quad (\text{eq. 8-28})$$

, dans laquelle :  $\gamma_a^\# = 2\gamma_a$ .

Le problème d'affectation devient celui traditionnel présenté en section §8.3 où la demande du volume  $Q$  et du taux d'équipement  $\beta$  est affecté sur un réseau du jeu de paramètres :  $\alpha_a, \gamma_a^\#$  (au lieu de  $\alpha_a, \gamma_a$ ).

En remplaçant  $2\gamma_a$  par  $\gamma_a^\#$ , le problème d'affectation est identique à un celui de l'équilibre de l'utilisateur présenté en §8.3. Ce problème d'affectation, qui s'appelle l'optimum du système, est traité au Chapitre 7.

### 8.5.3. Résultats analytiques pour le cas des coûts moyens égaux

Pour le cas d'égalité des coûts moyens, les indicateurs peuvent être formulés de manière analytique comme suivant :

- Le gain individuel d'être équipé

$$\Gamma_{DT} = G[-\gamma \cdot \beta \cdot Q] \quad (\text{eq. 8-29})$$

- Le temps de parcours moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers s'élève à :

$$\bar{T}_{DT} = \theta - \beta \cdot G\left(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q\right) - \frac{\Delta \alpha^2}{4 \cdot \gamma \cdot Q} - \left[ \frac{\sigma^2}{2 \cdot \gamma \cdot Q} \left[ \frac{1}{2} - F(-\gamma \cdot \beta \cdot Q) \right] + \beta \left[ \frac{1}{2} \cdot G(-\gamma \cdot \beta \cdot Q) - G\left(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q\right) \right] \right] \quad (\text{eq. 8-30})$$

## 8.6. COMPARAISON DE DIFFERENTS PLANS DE GESTION DU TRAFIC

Dans les trois sections précédentes, les formules analytiques du coût moyen par voyage subi par tous les utilisateurs ont été déterminés. La comparaison de différents plans de gestion du trafic comment avec une définition des plans de gestion (8.6.1), puis une comparaison analytique (§8.6.2) et une investigation numérique (§8.6.3) vont nous permettre de mieux comprendre, en particulier sur la sensibilité des effets quant à la configuration réseau ou au taux d'équipement.

### 8.6.1. Plans de gestion du trafic

La combinaison des deux options en matière d'information dynamique du trafic et de trois options en matière de tarification de la congestion rend totalement six plans de gestion possibles:

<i>Information</i> <i>Tarification</i>	<i>Sans information</i>	<i>Avec information</i>
Sans tarification	(1)	(2)
Tarification fixe	(3)	(4)
Tarification dynamique	(5)	(6)

**Tab. 8-1 : Plan de gestion combinant l'information aux usagers et la tarification de la congestion**

### 8.6.2. Analyse analytique

Dans l'hypothèse où les coûts moyens sur les deux routes sont égaux, les temps de parcours moyens sans mesure de régulation sont égaux et s'élèvent à  $\theta$ . Le bénéfice donné apporté par le service d'information aux usagers et le système de tarification sous la stratégie  $S$ , est l'écart entre  $\theta$  and  $\bar{T}_p$

Sous la stratégie no-tolling, le bénéfice apporté par l'information dynamique de trafic est  $\beta \cdot G(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q)$  qui est une fonction positive de  $\beta$ . Cependant elle atteint son maximum à une valeur relativement faible de  $\beta$

Sous la stratégie flat-tolling et la présence de l'information dynamique, le bénéfice est  $\frac{\Delta \alpha^2}{4\gamma Q} + \beta \cdot G(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q)$  qui se compose de deux parties :

- Bénéfice de l'information dynamique :  $\beta \cdot G(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q)$
- Bénéfice de la tarification avec la stratégie flat-tolling :  $\frac{\Delta \alpha^2}{4\gamma Q}$

Sous la stratégie dynamic-tolling en présence de l'information dynamique, le bénéfice est encore plus élevé :

$$\beta \cdot G(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q) + \frac{\Delta \alpha^2}{4 \cdot \gamma \cdot Q} + \left[ \frac{\sigma^2}{2 \cdot \gamma \cdot Q} \left[ \frac{1}{2} - F(-\gamma \cdot \beta \cdot Q) \right] + \beta \left[ \frac{1}{2} \cdot G(-\gamma \cdot \beta \cdot Q) - G(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q) \right] \right]$$

, qui peut se diviser en trois parties :

- Le bénéfice pur de l'information dynamique :  $\beta G(-\frac{1}{2} \gamma \beta Q)$  qui dépend des paramètres du réseau, du volume de demande et du taux d'équipement.
- Le bénéfice pur de la tarification optimale :  $\frac{\Delta \alpha^2}{4\gamma Q}$  qui dépend uniquement des paramètres du réseau et du volume de demande.
- Le bénéfice conjoint de l'information dynamique et la tarification de la congestion :  $\left[ \frac{\sigma^2}{2 \cdot \gamma \cdot Q} \left[ \frac{1}{2} - F(-\gamma \cdot \beta \cdot Q) \right] + \beta \left[ \frac{1}{2} \cdot G(-\gamma \cdot \beta \cdot Q) - G(-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q) \right] \right]$  qui est un terme positif et croissant de  $\beta$

Au niveau individuel, le gain d'être équipé est identique sous les deux stratégies NT et FT :  $\Gamma^{NT} = \Gamma^{FT} = G[-\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \beta \cdot Q]$ . Sous la stratégie DT, le gain d'être équipé  $\Gamma^{DT} = G[-\gamma \cdot \beta \cdot Q]$  semble inférieur à celui sous d'autres stratégies.

### 8.6.3. Investigation numérique

#### Paramètre numérique

Nous prenons deux réseaux stylisés comme suivant:

- «Autoroute versus Artère urbaine» où une route domine l'autre à la fois en capacité et en temps libre. Les valeurs numériques des paramètres sont fixées à :  $\alpha_1 = 40$ ,  $\gamma_1 = 1$  et  $\alpha_2 = 80$ ,  $\gamma_2 = 2$ .
- « Artère urbaine versus Rue urbaine» où chacune dispose son propre avantage soit en capacité soit en temps libre. Les valeurs numériques des paramètres sont fixées à :  $\alpha_1 = 40$ ,  $\gamma_1 = 2$  et  $\alpha_2 = 80$ ,  $\gamma_2 = 1$ .

Les perturbations aléatoires additives aux temps de parcours are prises comme variables indépendantes, Gaussiennes centrées : chacune a variance  $\sigma^2/2$  afin d'assurer que la variable  $Z = \zeta_2 - \zeta_1$  a la variance  $\sigma^2$ . La valeur de  $\sigma$  est fixé à 40, qui produit temps de parcours avec la dispersion relative  $\sigma/\bar{t}\sqrt{2}$  qui décroît de 2/3 à 1/5 au cas où les débits augmentent.

Le volume  $Q$  de demande varie de 5 à 150 par pas de 5 afin d'examiner un grand rang des conditions de trafic. Le taux d'équipement  $\beta$  est varié de 0% à 100% par incrément de 1%.

### A faible demande

Le temps de parcours moyen par déplacement pour tous les usagers sur toutes les occurrences est représentatif au bien-être social du système. A faible volume de demande  $Q=10$  (Fig. 8–6), information dynamique de trafic contribue significativement à améliorer la performance du réseau. Cependant, la tarification de la congestion ne donne aucun impact sur le système. C'est assez logique car la tarification de la congestion n'est pas vraiment nécessaire pour le trafic peu congestionné.

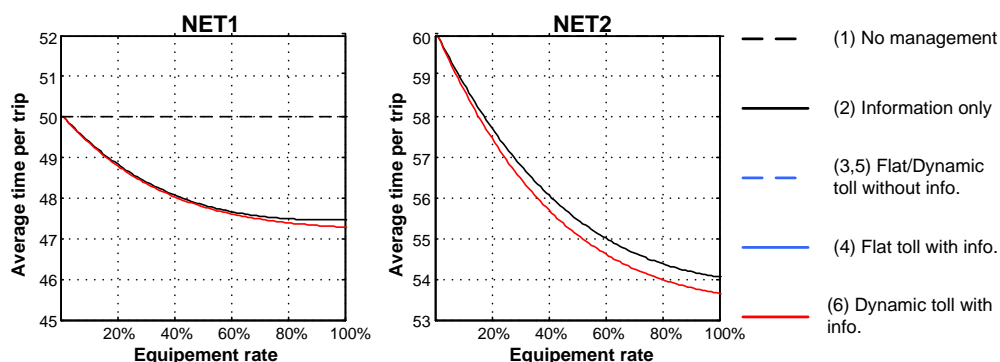


Fig. 8–6 : Temps moyen par déplacement à faible volume de demande  $Q=10$  sous différents plan de gestion

### Fort volume de demande

Le cas de fort volume de demande,  $Q=100$  - illustré en Fig. 5, est plus intéressant. Les effets de la gestion de la demande sur le temps de parcours moyen par déplacement est beaucoup plus significatif.

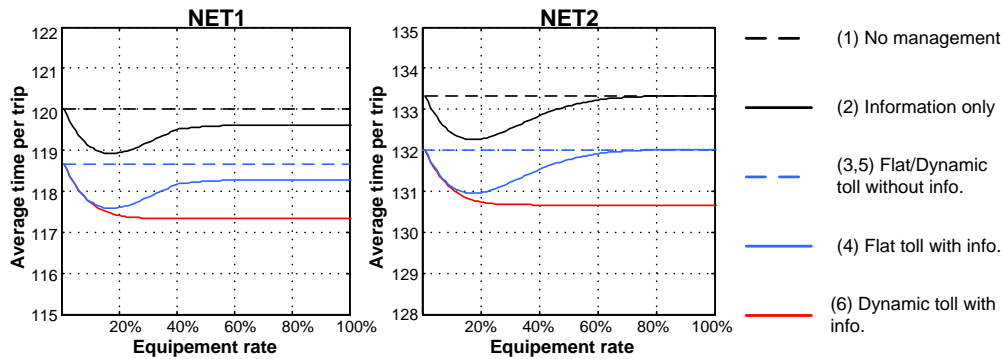


Fig. 8-7 : Temps moyen par déplacement à fort volume de demande  $Q=100$  sous différents plan de gestion

La différence entre la courbe du haut (1) et la courbe continue, noire (2) représente la pure valeur de l'information dynamique de trafic. Il est intéressant à remarquer que le bénéfice de l'information dynamique atteint son maximum à une valeur assez faible du taux d'équipement.

La différence entre la courbe noire continue (2) et la courbe bleue continue (4) ainsi qu'entre la ligne du haut (1) et la courbe dash bleue (3,5) représente la valeur pure de la tarification de la congestion. Elle est constante en fonction du taux d'équipement.

La différence entre la courbe rouge continue (6) et la courbe bleue continue (4) représente le bénéfice donné par une synchronisation entre les deux mesures de gestion de la demande. Le bénéfice augmente en fonction du taux d'équipement.

### 8.7.CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, les effets de le l'information dynamique de trafic et de la tarification de la congestion sont modélisés conjointement avec la présence de la congestion récurrente et non-récurrente. Les bénéfices provenant de la tarification de la congestion et du service d'information dynamique aux usagers ont été formulés de manière analytique. En outre, les formules analytiques nous ont permis de séparer le bénéfice total en différentes composantes : le bénéfice pur du service d'information dynamique aux usagers, le bénéfice pur de la tarification (statique) à la congestion et le bénéfice d'une application conjointe et la synchronisation de l'information aux usagers et la tarification de la congestion.

Outre la simplification de la structure du réseau à deux arcs en parallèle, notre traitement est soumis à plusieurs restrictions. Premièrement, la congestion récurrente est modélisée d'une façon statique, en supposant que le temps de parcours est une fonction linéaire du débit en arc. Cela correspond aux effets de la congestion légère ou moyenne pas aux ceux de la congestion sévère. Deuxièmement, la dynamique des perturbations sur les temps de parcours est modélisée comme variable aléatoire en impliquant des hypothèses spécifiques : (i) indépendance entre les perturbations ; (ii) distribution gaussienne ; (ii) homoskedasticité. Il n'est pas difficile pour régler la dépendance et l'hétéroscédasticité dans l'hypothèse gaussienne par une adaptation spécifique de la différence dans les temps de parcours en arc, notre variable  $Z$ . En outre, nous avons montré que il n'avait pas de différence significative entre les effets donnés par l'hypothèse gaussienne et ceux donnés par une hypothèse Bernoulli exponentielle car la propriété symétrique est maintenue pour la distribution de la variable  $Z$ .

Des travaux complémentaires sur notre modèle peuvent s'adresser sur les sujets suivants :

- Investigation numérique sur des perturbations dépendantes et heteroskedastiques, e. g. cas des variables Bernoulli exponentielles pour l'instance.
- Etude analytique sur les interactions entre la congestion récurrente, non-récurrente et le service d'information dynamique et la gestion de capacité.
- Etude analytique sur les interactions entre la congestion récurrente ou non récurrente, le service d'information et le paramétrage de la tarification afin d'évaluer la complémentarité et la redondance éventuelle des deux outils pour améliorer l'état du système.

## Chapitre 9. Gestion de capacité et information aux usages

---

### 9.1.INTRODUCTION

#### 9.1.1.Contexte

Selon la cible visée par l'action, les mesures de gestion du trafic sont classées en deux : l'approche « demande » tente à modifier structure spatio-temporelle de la demande afin de mieux utiliser l'infrastructure, par exemple la tarification de la congestion, l'information aux usagers, etc. ; l'approche « offre » tente à adapter l'offre à la demande ; ce dernière comprend plusieurs mesures dont la plupart sont lié à la gestion de capacité sous une variété de formes (cf. Chapitre 3) :

- Les feux à intersection sont la forme la plus traditionnelle. A une intersection à feux, le système de feux est utilisé d'une part pour séparer les flux entrant au nœud afin d'éliminer les conflits de trafic de différentes directions. Par la stratégie utilisée pour le paramétrage, le système de feux est utilisé pour réguler la capacité admise pour chaque direction de circulation. En négligeant le temps perdu (par les feux jaunes), le système de feux permet de réguler le partage de la capacité totale au nœud à différentes directions de circulation traversant le nœud
- La régulation d'accès limite le débit entrant l'autoroute à la rampe régulée afin d'optimiser l'écoulement sur la section courante. Cette mesure peut être interprétée autrement, comme une gestion de capacité au nœud entre le flux courant (sur l'autoroute) et le flux entrant.
- L'allocation variable de voies est la mesure la plus récente. Certains dispositifs spécifiques permettent de moduler l'allocation de voies pour un sens de circulation donc un changement de capacité.

Les stratégies adoptées pour une mesure de gestion sont également diverses. Au niveau temporel, nous distinguons la régulation statique dont les paramètres de contrôles sont fixés dans le temps et la régulation dynamique dont les paramètres de contrôle sont variés en fonction des conditions du trafic, des données recueillies. Au niveau spatial, nous distinguons la régulation locale dont les paramètres sont optimisés localement ou la régulation coordonnée dont les paramètres de plusieurs points de contrôle sont optimisés ensemble.

A priori, le contrôle de trafic affecte les conditions de circulation, puis le choix d'itinéraire des usagers. Réciproquement, la diffusion de l'information change le chargement du trafic sur le réseau et par conséquent les paramètres de contrôle de trafic. Si les interactions entre la diffusion de l'information et le contrôle de trafic ne sont pas prises en compte, l'information diffusée devient moins crédible

et le contrôle de trafic devient moins approprié. (Cf. (Abdel-Aty et Huang, 2004) pour plus d'éléments empiriques).

### **9.1.2.Revue bibliographique**

#### **Contrôle de trafic et affectation du trafic**

Traditionnellement, les méthodes classiques du paramétrage de cycle de feux, par exemple (Webster, 1958), supposent que les débits soient donnés pendant que l'affectation du trafic suppose que l'offre de transport soit fixée. Cela semble insatisfaisant car le paramétrage des cycles de feux, le choix d'itinéraire des usagers et l'affectation du trafic sont mutuellement dépendants. Dans un effort de réduire l'incohérence entre le paramétrage de cycle de feux et l'affectation du trafic, (Allsop, 1974) a suggéré que les effets du contrôle de trafic sur l'affectation doivent être pris en compte de manière explicite en considérant conjointement le problème du paramétrage de cycle de feux et celui de choix d'itinéraire.

(Allsop, 1974) et (Gartner, 1975) ont développé une procédure itérative traitant les deux problèmes de façon séquentielle en actualisant les durée de temps verts pour les débits fixes et résolvant le problème de l'équilibre du trafic pour le réglage du signal fixe. En suite, dans un nombre d'articles successives, Smith a fourni une base mathématique nécessaire pour ce problème (voir entre autres (Smith et Van Vuren, 1993)). Premièrement, il a montré que plusieurs solutions peuvent exister et certaines méthodes de paramétrage traditionnelles par exemple celle de Webster, peuvent conduire à un équilibre instable (Smith, 1979; Smith, 1979) et aggraver les conditions du trafic. Pour certains cas réels, l'implantation des cycles de feux responsives a détérioré le temps de parcours de 30% ((Smith, 1980)). Il a proposé ainsi une nouvelle politique de paramétrage, appelée Po, qui est plus efficace que celle de Webster, vise à maximiser la capacité de l'intersection et à assurer un équilibre de l'utilisateur stable.

Suivant les travaux de Smith, nombreux travaux ont contribué à traiter ce problème en considérant l'affectation statique du trafic, de différentes stratégies de contrôle, la coordination des feux à plusieurs intersections comme un problème d'optimisation bi-niveau (Smith et Ghali, 1990), (Cantarella, Improta *et al.*, 1991), (Yang et Yagar, 1995), (Yang et Bell, 1998), (Cipriani et Gori, 2000) et (Cipriani et Fusco, 2004)

Pendant des années 1990s et 2000s, nombreux travaux s'adressent à traiter ce problème dans l'affectation dynamique dont le premier est (Friesz, Luque *et al.*, 1989) bien que les paramètres de contrôle de trafic ne sont pas spécifiées. Puis les cadres de simulation ont été proposés par (Abdelfatah et Mahmassani, 1998), (Chen et Ben-Akiva, 1998), (Gartner et Stamatiadis, 1998), etc. (cf. (Ai-Ping et Zi-You, 2005) pour une revue complète)



En dehors des travaux spécifiquement sur le paramétrage de feux, nous trouvons également d'autres qui s'adressent à l'allocation variable de voies, au contrôle d'accès, tels que (Yang et Yagar, 1994) pour le contrôle d'accès, (Zhang et Gao, 2007) pour les voies réversibles

(Clegg, Clune *et al.*, 2000) a proposé un cadre d'analyser les cycles de feux favorisant les transports collectifs en tenant en compte le choix d'itinéraire des usagers. (Ghaii et Smith., 1993) et (Smith, 2006) ont traité des politiques de gestion commune des cycles de feux et de la tarification dans l'affectation dynamique du trafic.

### **Contrôle de trafic, information aux usagers et affectation du trafic**

Bien que l'apparition de l'information de trafic aux usagers affecte l'affectation du trafic et la pertinence des mesures de contrôle de trafic, il y a rarement de travail dans la littérature scientifique qui s'adresse sur l'interaction entre le contrôle de trafic, l'information aux usagers dans l'affectation du trafic. Citons ici les travaux liés trouvés dans la littérature : (Taale et Van Zuylen, 2002) étudie le problème d'incertitude des usagers en utilisant un modèle d'affectation stochastique (type Logit ou Probit) ; (Taale et van Zuylen, 2003) traite le même problème avec trois classes d'usagers de différents niveaux de familiarisation au réseau (modèle C-Logit) ; (Wu, Sun *et al.*, 2009) traite l'allocation variable de voie comme un problème d'optimisation discrète (avec affectation statique, fonction BPR, deux classes d'usagers Logit, en fonction de l'information).

le problème d'optimisation conjoint affectation/paramétrage des feux à intersection commence à être traité par certains auteurs, tels que (Lee et Machemehl, 1999), (Karoonsoontawong, 2007), (Porche et Lafortune, 1998). Il n'y a pratiquement pas de travail qui intègre les impacts de l'information du trafic aux usagers, sauf (Hu et Mahmassani, 1997) ou (Hawas, 2004) qui utilise la théorie de flou pour modéliser l'optimisation conjointe de l'information aux usagers et le contrôle de trafic (cycle de feux) dans l'affectation dynamique-déterministe. Cependant, ces travaux ne prennent pas en compte la dynamique du réseau, i.e. la présence des perturbations exogènes.

#### **9.1.3.Objectif**

Nous nous focalisons à analyser les interactions entre la diffusion de l'information aux usagers et l'allocation de capacité en présence de la congestion récurrente et des perturbations exogènes.

Comme les chapitres précédents, nous continuons d'appliquer notre modèle à un réseau de deux arcs parallèles avec la fonction de coût affine linéaire.

#### 9.1.4.Méthode

Afin de nous focaliser sur les interactions complexes entre les différentes composantes d'un système de gestion du trafic, ne chercherons pas à modéliser de manière fine une forme spécifique de la gestion de capacité comme (Smith, 1979), (Smith et Van Vuren, 1993) pour le problème de contrôle de feux à intersection ou (Wu, Sun *et al.*, 2009) pour l'application des voies réversibles. Nous supposons que l'opérateur est capable de moduler le partage de capacité entre les deux routes reliant d'une origine à une destination (ce partage de capacité ressemble au contrôle de diagramme de feux à intersection : la modulation de diagramme de feux engendre à un changement de temps admis à chaque direction de circulation, donc un changement de capacité admise à chaque direction de circulation). La stratégie de contrôle par l'opérateur peut être statique ou dynamique.

#### 9.1.5.Structure du chapitre

Hors de l'introduction et de la conclusion, ce chapitre comprend 4 sections. La section §9.2 consacrera à rappeler les hypothèses de base et à intégrer les hypothèses de l'allocation de capacité optimale. Les deux stratégies « allocation fixe » et « allocation variable » seront traitées successivement en section §9.3 et §9.4. Des comparaisons analytiques et numériques seront présentées en §9.5.

### 9.2.FORMULATION DES HYPOTHESES

En rappelant les hypothèses de bases qui ne sont pas changées par rapport le jeu d'hypothèses présenté dans le chapitre 6, nous allons spécifier les hypothèses concernant la gestion de capacité : le rapport entre la modulation de capacité et la fonction débit/temps, les stratégies d'optimisation possibles (§9.2.2). Puis dans la section §9.2.3, nous allons ajuster les hypothèses de la demande pour adapter à la présence de la gestion de capacité.

#### 9.2.1.L'offre de transport

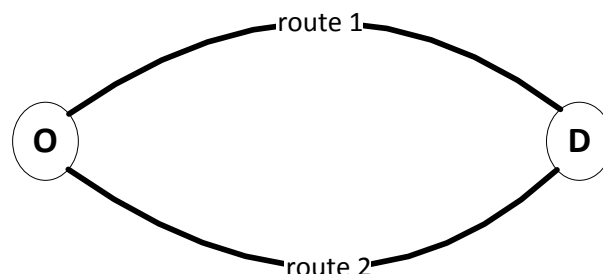


Fig. 9–1 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination

Considérons un réseau de transport se composant de deux arcs  $a \in A$ , l'ensemble des arcs, avec nœuds  $n \in N$ , l'ensemble des nœuds. Notre application sera limitée à un cas d'école, un réseau stylisé de deux arcs en parallèle reliant une origine et une destination, figuré en Fig. 9–1: donc  $a \in \{1,2\}$

Sur chaque arc  $a$  du réseau, le débit  $x_a$  induit un temps de parcours individuel  $T_a$  qui est soumis à des effets de congestion par la base de la fonction temps de parcours-débit  $T_a = \tilde{t}_a(x_a)$ , une fonction croissante du débit en arc. Pour l'instance, nous prenons une fonction affine linéaire comme suivante :  $\tilde{t}_a(x_a) = \alpha_a + \gamma_a x_a$  dans laquelle  $\alpha_a$  est temps de parcours à vide et  $\gamma_a$  la sensibilité du temps de parcours individuel au débit (Fig. 9–2). Cette hypothèse est convenable à un état du trafic sans fil d'attente (peu saturé), pas à un état saturé dans lequel le débit est limité par la capacité d'écoulement.

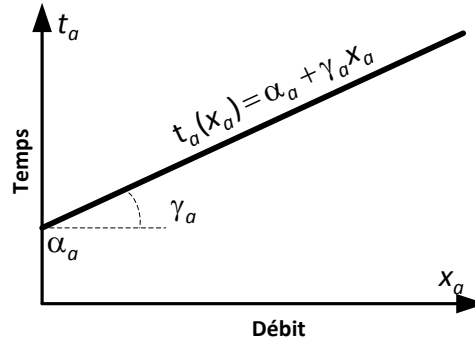


Fig. 9–2 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps

En dépit de notre modèle d'écoulement qui est essentiellement stationnaire, on doit tenir en compte les effets dynamiques inter-période, autrement dit la variabilité inter-période à être modélisée par une variable aléatoire. A cette fin, nous supposons qu'il existe un ensemble  $\Omega$  des circonstances  $\omega$  (ou périodes), dont chacune correspond à des débits en arc  $x_{a\omega}$  et temps de parcours sur arc :

$$T_{a\omega} = \tilde{t}_a(x_{a\omega}) + \zeta_a(\omega) \quad (\text{eq. 9-1})$$

La variable aléatoire  $\zeta_a(\omega)$  modélise la variation éventuelle du temps de parcours qui paraît due à perturbations exogènes. Cette variable aléatoire est supposée d'avoir variance  $\sigma_a^2$  et moyenne nulle (Fig. 9–3). Pour simplicité, nous supposons que les variables  $\zeta_a(\omega)$  (de deux arcs) sont indépendamment distribuées.

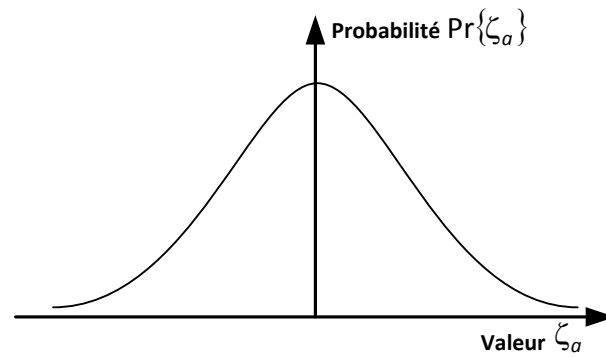


Fig. 9-3 : Distribution gaussienne des perturbations

Nous avons la formule du temps de parcours moyen sur l'ensemble des occurrences :

$$E_{\omega}[T_{a\omega} : x_{a\omega} = x] = \tilde{t}_a(x) \quad (\text{eq. 9-2})$$

### 9.2.2. Allocation de capacité et stratégies d'optimisation

Pour ce cas d'école, nous supposons que les deux routes partagent une capacité totale fixe  $\kappa_0$ . Notons  $\lambda \in [0, 1]$  le taux de partage de capacité qui détermine la capacité sur chaque route :  $\kappa_1 = \lambda \kappa_0$  et  $\kappa_2 = (1 - \lambda) \kappa_0$ . De plus, on suppose que l'opérateur du réseau dispose certain dispositif/équipement spécifique pour modifier le taux de partage. La gestion de capacité devient un problème d'optimisation continue :  $\lambda$  peut varier de manière continue dans le domaine  $[0, 1]$ .

#### Effet de l'allocation de capacité sur la sensibilité à la congestion

Pour analyser les impacts de la gestion de capacité sur le trafic, il est nécessaire de spécifier le lien entre la capacité de l'arc  $\kappa_a$  et les paramètres de la fonction débit- temps  $\alpha_a$  et  $\gamma_a$ . Par nature, le paramètre  $\alpha_a$  temps-à-vider dépend plutôt de la longueur et de la vitesse limitée sur arc que de la capacité sur l'arc  $\kappa_a$ . Cependant le paramètre  $\gamma_a$  la sensibilité à la congestion est disproportionnel à la capacité  $\kappa_a$  puisque le renforcement de la capacité légèrè les effets de congestion sur le temps de parcours.

En nous appuyant sur les discussions ci-dessus, nous supposons que  $\gamma_a$  soit une fonction simple de  $\lambda$ , comme suivant :

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \frac{\gamma_0}{\lambda} \\ \gamma_2 &= \frac{\gamma_0}{1-\lambda}\end{aligned}\tag{eq. 9-3}$$

, dans lesquels  $\gamma_0$  est paramètre indépendant de route

### Effet de la gestion de capacité sur les perturbations

Il reste encore à discuter l'influence de la gestion de capacité sur les perturbations, nous avons deux cas de figure

- Des conditions de trafic difficiles réduisant la vitesse pratiquée sur le long de la route : l'allocation de capacité n'affecte pas les effets des perturbations sur le temps de parcours.
- Des incidents/accidents bloquant une partie de la route : l'allocation de capacité affecte les effets des perturbations sur le temps de parcours.

Pour faciliter le traitement, nous prenons l'hypothèse selon le premier cas de figure, à savoir : l'allocation de capacité ne donne pas d'influence sur les perturbations.

A ce stade, les fonctions de temps de parcours peuvent reformulées comme suivant :

$$\begin{aligned}t_{1\omega} &= t_1(\lambda, x_{1\omega}) = \alpha_1 + \frac{\gamma_0}{\lambda} x_{1\omega} + \zeta_{1\omega} \\ t_{2\omega} &= t_2(\lambda, x_{2\omega}) = \alpha_2 + \frac{\gamma_0}{1-\lambda} x_{2\omega} + \zeta_{2\omega}\end{aligned}\tag{eq. 9-4}$$

### Les stratégies de capacité optimale

Afin d'améliorer la performance du réseau, l'opérateur va chercher à optimiser l'allocation de capacité afin de maximiser la performance du système, à savoir minimiser le temps de déplacement de l'ensemble des usagers. Supposons que l'opérateur dispose des équipements nécessaires pour faire varier le paramètre de partage de capacité  $\lambda$  dans le domaine  $[0, 1]$ . En considérant la façon dont l'opérateur réagit aux circonstances, les deux stratégies suivantes peuvent être adoptées pour l'allocation de capacité :

- La stratégie « *allocation fixe* », dénotée  $SC^1$  : au lieu d'adapter le paramètre  $\lambda$  à chaque occurrence  $\omega$ , l'opérateur cherche à appliquer une

---

<sup>1</sup> Static Control

allocation de capacité  $\bar{\lambda}^*$  avec lequel le temps moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers sur toutes les occurrences  $\omega$  est minimisé.

$$\bar{\lambda}^* : \min_{\lambda \in [0,1]} \left[ \frac{1}{Q} E(x_{1\omega} t_{1\omega} + x_{2\omega} t_{2\omega}) \right] \quad (\text{eq. 9-5})$$

- La stratégie « *allocation dynamique* », dénotée DC<sup>1</sup> : à chaque occurrence  $\omega$ , l'opérateur cherche à appliquer une allocation de capacité  $\lambda_{\omega}^*$  qui le temps moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers sur l'occurrence  $\omega$  :

$$\lambda_{\omega}^* : \min_{\lambda \in (0,1)} \left[ \frac{1}{Q} (x_{1\omega} t_{1\omega} + x_{2\omega} t_{2\omega}) \right] \quad (\text{eq. 9-6})$$

Il est nécessaire de noter que l'allocation  $\bar{\lambda}^*$  peut être éventuellement sous optimal pour une occurrence  $\omega$  donnée, mais  $\bar{\lambda}^*$  est la stratégie optimale pour le cas où l'opérateur ne dispose pas d'équipement nécessaire pour la gestion dynamique de capacité.

### 9.2.3. La demande

Nous supposons que tous les usagers choisissent leur itinéraire lors de leur déplacement de l'origine vers la destination de la même manière de raisonnement : minimiser leur coût individuel. Tout fois, la décision de chaque usager dépend également de la connaissance sur les conditions du trafic dont il dispose.

L'utilisateur informé est supposé de connaître parfaitement les conditions de trafic quelque soit la circonstance :

$$t_a^I(\omega) = t_a(\omega) \quad (\text{eq. 9-7})$$

Pendant que l'utilisateur non-équipé est supposé de connaître une connaissance grossière sur les conditions du trafic, c'est-à-dire les valeurs moyennes des temps.

$$t_a^N = E_{\omega}[t_a(\omega)]. \quad (\text{eq. 9-8})$$

Pour l'instant, le coût à l'utilisateur est limité au temps de déplacement, en négligeant les péages, le confort ou d'autres critères de qualité. Nous focalisons sur les perturbations qui font de notre principale préoccupation.

---

<sup>1</sup> Dynamic Control

Pour l'arc  $a$ , et la classe d'utilisateurs  $u \in \{I, N\}$  à l'occurrence  $\omega$ , notons  $x_a^u(\omega)$  le débit sur l'arc, il détient que :

$$\begin{aligned} x_a(\omega) &= x_a^I(\omega) + x_a^N(\omega) \\ x_1^I(\omega) + x_2^I(\omega) &= q^I \\ x_1^N(\omega) + x_2^N(\omega) &= q^N \end{aligned} \quad (\text{eq. 9-9})$$

#### 9.2.4. L'équilibre offre-demande

Une fois que le plan optimal de gestion de capacité est fixé, la classe informée va être affectée sur le réseau selon certaine règle d'affectation. Pour l'instance, supposons que l'opérateur essaie toujours de minimiser le temps de parcours global subi par tous les utilisateurs routiers dans le système.

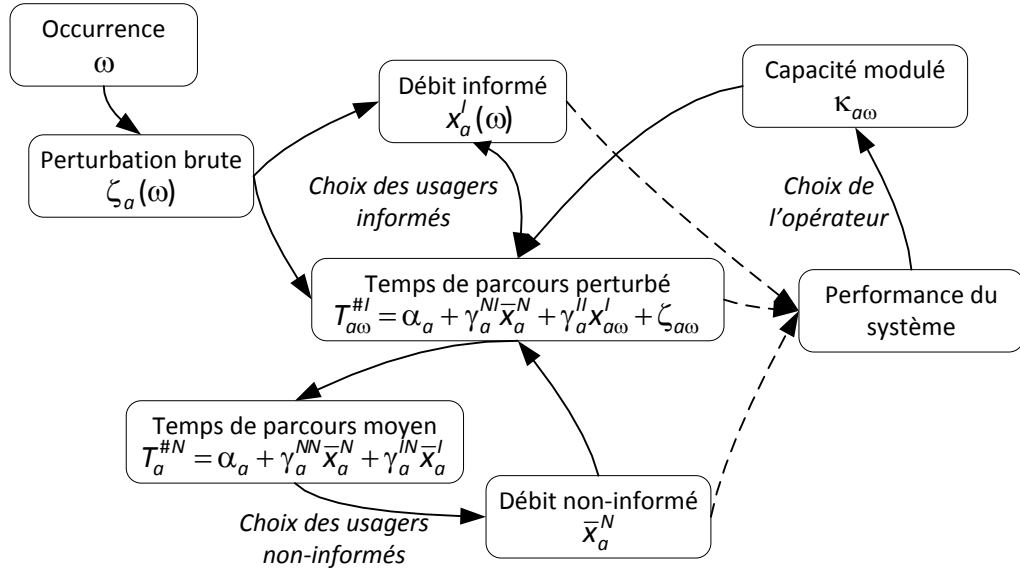


Fig. 9–4. Structure du bi-niveau équilibre avec les stratégies de gestion de capacité

La Fig. 9–4 fournit une description claire concernant la structure de l'équilibre bi-niveau : à chaque occurrence  $\omega$  avec les perturbations brutes  $\zeta_a$ , l'opérateur du réseau calcule un plan optimal sur la base du temps globale subi par les utilisateurs : la façon dont l'opérateur calcule le plan optimal dépend évidemment de la stratégie adoptée : active ou passive. Puis la classe informée est affectée sur le réseau selon le principe l'équilibre de l'utilisateur. Visiblement, les utilisateurs informés déterminent les temps de parcours instantanés sur chaque itinéraire, puis les temps de parcours moyens qui conduisent à l'affectation des utilisateurs non-informés.

### 9.2.5. Indicateurs de la performance du système

Comme dans les chapitres précédents, les indicateurs économiques pour évaluer la performance du système sont : i) le coût moyen par déplacement par classe  $\bar{C}^N$ ,  $\bar{C}^I$ , et ii) le coût moyen global du système  $\bar{C}$ .

### 9.3. ALLOCATION FIXE DE CAPACITE

Supposons que l'opérateur adopte la stratégie « allocation fixe », autrement dit l'opérateur fixe une allocation de capacité pour toutes les occurrences sans adapter dynamiquement l'allocation à chaque circonstance. Cette fois, l'opérateur cherche à appliquer une allocation de capacité  $\bar{\lambda}^*$  qui minimise le temps moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers sur toutes les occurrences  $\omega$  :

$$\bar{\lambda}^* : \min_{\lambda \in (0,1)} \left[ \frac{1}{Q} E(x_{1\omega} t_{1\omega} + x_{2\omega} t_{2\omega}) \right] \quad (\text{eq. 9-10})$$

Sous la stratégie d'optimisation, le paramètre de partage de capacité  $\bar{\lambda}$  devient une variable dans l'équilibre du trafic :

**Fig. 9–5 : Relation entre les variables : stratégie d'allocation de capacité fixe**

Nous analysons ensuite l'enchaînement des variables montrés dans en Fig. 9–5. Nous considérons d'abord l'affectation instantanée et moyenne de la classe informée pour une allocation de capacité  $\bar{\lambda}$  donnée. Puis l'affectation de la classe non-informée. Les deux étapes précédentes nous permettent de formuler la fonction d'objectif du problème d'optimisation du temps global qui déduit le plan de capacité optimal  $\bar{\lambda}^*$ . En fin, les indicateurs économiques sont calculés. Cette procédure d'analyse reste identique à celle présentée en §6.3, sauf que  $\gamma_a$ ,  $\alpha_a^I$ , A, B sont des variables dépendantes de  $\bar{\lambda}$  selon §9.2.2.



### 9.3.1. Affectation instantanée et moyenne des usagers informés

En notant  $\alpha'_a(\bar{\lambda}) = \alpha_a + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot \bar{x}_a^N$ ,  $T_{a\omega} = \alpha'_a(\bar{\lambda}) + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot x'_a(\omega) + \zeta_{a\omega}$  est le temps de l'arc  $a$  à l'occurrence  $\omega$ . S'il y avait qu'un usager informé, il choisirait l'itinéraire de minimum  $T_{a\omega}(0) = \alpha'_a + \zeta_{a\omega}$ . Cependant, la réaffectation dynamique des usagers informés va tenter d'augmenter le temps de cette route due à sa fonction de congestion : cet effet peut résulter une compensation partielle, c'est-à-dire  $T_{a\omega}$  reste encore moins que  $T_{b\omega}$  ou une compensation totale, c'est-à-dire l'égalité des temps :

$$\alpha'_a(\bar{\lambda}) + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot x'_a(\omega) + \zeta_{a\omega} = \alpha'_b(\bar{\lambda}) + \gamma_b(\bar{\lambda}) \cdot x'_b(\omega) + \zeta_{b\omega} \quad (\text{eq. 9-11})$$

Dans le dernier cas,  $x'_a(\omega) + x'_b(\omega) = q'$  conduit à :

$$x'_a(\omega) = \frac{\gamma_b(\bar{\lambda}) \cdot q' + \alpha'_b(\bar{\lambda}) + \zeta_b - \alpha'_a(\bar{\lambda}) - \zeta_a}{\gamma_a(\bar{\lambda}) + \gamma_b(\bar{\lambda})} \quad (\text{eq. 9-12})$$

$$\text{, et: } T_{a\omega} = \frac{\gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot \gamma_b(\bar{\lambda}) \cdot q' + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot \alpha'_b(\bar{\lambda}) + \gamma_b(\bar{\lambda}) \cdot \alpha'_a(\bar{\lambda})}{\gamma_a(\bar{\lambda}) + \gamma_b(\bar{\lambda})} + \frac{\gamma_b(\bar{\lambda}) \cdot \zeta_a + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot \zeta_b}{\gamma_a(\bar{\lambda}) + \gamma_b(\bar{\lambda})} \quad (\text{eq. 9-13})$$

Dans le cas précédent, nous avons  $x'_{a\omega} = q'$  et  $x'_{b\omega} = 0$ , puis  $T_{a\omega} = \alpha'_a(\bar{\lambda}) + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot q' + \zeta_{a\omega}$  et  $T_{b\omega} = \alpha'_b(\bar{\lambda}) + \zeta_{b\omega}$ , avec  $T_{a\omega} \leq T_{b\omega}$ . Cette condition est équivalente à :  $\zeta_{b\omega} - \zeta_{a\omega} \geq \alpha'_a(\bar{\lambda}) - \alpha'_b(\bar{\lambda}) + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot q'$

### 9.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne des usagers informés

Pour calculer les débits par arc moyens des usagers informés, les  $\bar{x}_a^I$ , nous déconditionnons par rapport aux perturbations  $\zeta_1, \zeta_2$  tout en restant conditionnels aux  $\bar{x}_a^N$ .

Notant  $B(\bar{\lambda}) \equiv \alpha'_1(\bar{\lambda}) - \alpha'_2(\bar{\lambda}) + \gamma_1(\bar{\lambda}) \cdot q'$  et  $A(\bar{\lambda}) \equiv \alpha'_1(\bar{\lambda}) - \alpha'_2(\bar{\lambda}) - \gamma_2(\bar{\lambda}) \cdot q'$  : conditionnellement à  $z = \zeta_2 - \zeta_1$ , vous avons :

- si  $z > B(\bar{\lambda})$  puis  $T_{1\omega}(q') \leq T_{2\omega}(0)$  alors  $x'_1(\omega) = q'$  et  $x'_2(\omega) = 0$ ,
- si  $z < A(\bar{\lambda})$  puis  $T_{1\omega}(0) \geq T_{2\omega}(q')$  alors  $x'_1(\omega) = 0$  et  $x'_2(\omega) = q'$ ,
- si  $z \in [A(\bar{\lambda}), B(\bar{\lambda})]$  puis  $T_{1\omega} = T_{2\omega}$  aux débits  $x'_1(\omega) = \frac{z - A(\bar{\lambda})}{\gamma_1(\bar{\lambda}) + \gamma_2(\bar{\lambda})}$  et

$$x'_2(\omega) = \frac{B(\bar{\lambda}) - z}{\gamma_1(\bar{\lambda}) + \gamma_2(\bar{\lambda})}$$

En notant  $F$  la fonction de distribution de  $Z = \zeta_2 - \zeta_1$  sur l'ensemble  $\Omega$  des cas  $\omega$  et  $\tilde{F}$  sa fonction moment tronqué  $\tilde{F}(x) = \int_{-\infty}^x z dF(z)$ , par agrégations, vous avons :

$$\bar{x}'_1 = 0 \cdot \int_{-\infty}^{A(\bar{\lambda})} dF(z) + \int_{A(\bar{\lambda})}^{B(\bar{\lambda})} \frac{z - A(\bar{\lambda})}{\gamma_1(\bar{\lambda}) + \gamma_2(\bar{\lambda})} dF(z) + q' \cdot \int_{B(\bar{\lambda})}^{+\infty} dF(z) = q' - \bar{x}'_2 \quad (\text{eq. 9-14})$$

, dans laquelle :

$$\bar{x}'_2 = \frac{G(B(\bar{\lambda})) - G(A(\bar{\lambda}))}{\gamma_1(\bar{\lambda}) + \gamma_2(\bar{\lambda})} \text{ dont } G(x) \equiv x \cdot F(x) - \tilde{F}(x) \quad (\text{eq. 9-15})$$

L'indépendance de  $\zeta_1$  et  $\zeta_2$  entraîne le fait que  $Z$  est une variable aléatoire de moyenne  $\mu = \mu_2 - \mu_1 = 0$  et variance  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$

### 9.3.3. Affectation des usagers non-formés

Il reste à affecter les usagers  $N$  entre les deux arcs. Nous supposons que faute d'accès à l'information dynamique, un usager  $N$  perçoit uniquement les temps moyens des itinéraires, et choisit un itinéraire de temps moyen minimal. Reste à préciser de quel temps moyen s'agit-il, et la réponse à cette question dépendrait de l'exposition particulière de chaque usager  $N$ . Nous supposons que les usagers  $N$  sont tous exposés à l'ensemble des perturbations, et qu'ils subissent les temps moyens induits par les trafics et la congestion, les perturbations et leur amortissement par les usagers informés. Notant  $\alpha_a^N(\bar{\lambda}) \equiv \alpha_a(\bar{\lambda}) + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot \bar{x}'_a$  et comparant  $\alpha_1^N(\bar{\lambda})$  avec  $\alpha_2^N(\bar{\lambda})$  : conditionnellement à  $\bar{\lambda}$ , l'affectation de la classe non-informée suit également un des trois cas suivant :

- si  $\alpha_1^N(\bar{\lambda}) \geq \alpha_2^N(\bar{\lambda}) + \gamma_2(\bar{\lambda}) \cdot q^N$  alors  $\bar{x}_2^N = q^N$  et  $\bar{x}_1^N = 0$ .
- si  $\alpha_1^N(\bar{\lambda}) + \gamma_1(\bar{\lambda}) \cdot q^N \leq \alpha_2^N(\bar{\lambda})$  alors  $\bar{x}_1^N = q^N$  et  $\bar{x}_2^N = 0$ .
- si  $-\gamma_1(\bar{\lambda}) \cdot q^N \leq \alpha_2^N(\bar{\lambda}) - \alpha_1^N(\bar{\lambda}) \leq \gamma_2(\bar{\lambda}) \cdot q^N$  alors la classe non-informé s'affecte sur les deux routes avec l'égalité des temps moyens.

Le dernier cas :  $\bar{t}_a = \bar{t}_b = \theta$  avec  $\bar{t}_a = \alpha_a + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot \bar{x}'_a + \gamma_a(\bar{\lambda}) \cdot \bar{x}_a^N$  conduit à :

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= \bar{\lambda}Q + \frac{\bar{\lambda}(1-\bar{\lambda})}{\gamma_0}(\alpha_2 - \alpha_1) \\ \bar{x}_2 &= (1-\bar{\lambda})Q - \frac{\bar{\lambda}(1-\bar{\lambda})}{\gamma_0}(\alpha_2 - \alpha_1)\end{aligned}\quad (\text{eq. 9-16})$$

, et :

$$\bar{x}_1' = \bar{x}_2' = \frac{1}{2}q' = \frac{1}{2}\beta.Q \quad (\text{eq. 9-17})$$

La condition de non-négativité de  $\bar{x}_a^N$  amène à :

$$\begin{cases} \bar{\lambda} \geq \bar{\lambda}_A \equiv \frac{1}{2} \left[ (1 + \Delta\alpha^\#) - \sqrt{(1 + \Delta\alpha^\#)^2 - 2\beta.\Delta\alpha^\#} \right] \\ \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_B \equiv \frac{1}{2} \left[ (1 + \Delta\alpha^\#) - \sqrt{(1 + \Delta\alpha^\#)^2 - 2(2-\beta).\Delta\alpha^\#} \right] \end{cases} \quad (\text{eq. 9-18})$$

, dans laquelle :  $\Delta\alpha^\# = \frac{\gamma_0.Q}{\alpha_2 - \alpha_1}$

Les conditions d'affectation de la classe non-informée peuvent être réécrites comme suivant :

- si  $\bar{\lambda} < \bar{\lambda}_A$ , alors :  $\bar{x}_2^N = q^N$  et  $\bar{x}_1^N = 0$
- si  $\bar{\lambda} > \bar{\lambda}_B$  alors  $\bar{x}_1^N = q^N$  et  $\bar{x}_2^N = 0$ .
- si  $\bar{\lambda}_A \leq \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_B$  alors la classe non-informée s'affecte sur les deux routes avec l'égalité des temps moyens.

### 9.3.4. Plan de capacité statique optimal

L'équation d'optimalité peut être réécrite comme suivant :

$$\bar{\lambda}^* : \min_{\bar{\lambda} \in [0,1]} [\bar{C}(\bar{\lambda})] \quad (\text{eq. 9-19})$$

, dans laquelle :  $\bar{C}(\bar{\lambda}) = E(x_{1\omega}.t_{1\omega} + x_{2\omega}.t_{2\omega})$  est le temps moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers. Nous pouvons obtenir les 3 formules analytiques de  $\bar{C}(\bar{\lambda})$  pour 3 cas d'affectation montrés en §9.3.3 :

#### Cas 1 : la classe non-informée s'affecte sur la route 2 seulement

Nous avons :  $A(\bar{\lambda}) = \alpha_1 - \alpha_2 - \frac{\gamma_0}{1-\bar{\lambda}}.Q$  et  $B(\bar{\lambda}) = \alpha_1 - \alpha_2 + [\frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}}.\beta - \frac{\gamma_0}{1-\bar{\lambda}}.(1-\beta)].Q$ ,  
puis le coût moyen par déplacement pour la classe non-informée :

$$\bar{C}^N = \bar{t}_2 = \alpha_2 + \frac{\gamma_0}{1-\bar{\lambda}} \cdot (1-\beta) \cdot Q + \bar{\lambda} \cdot (G(B) - G(A)) \quad (\text{eq. 9-20})$$

, le coût moyen par déplacement pour la classe informée :

$$\bar{C}' = \bar{t}_1 - G(A) = \alpha_1 + \frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}} \cdot \beta \cdot Q - (1-\bar{\lambda}) \cdot G(B) - \bar{\lambda} \cdot G(A) \quad (\text{eq. 9-21})$$

Le coût moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers :

$$\bar{C}_1 = \alpha_1 \cdot \beta + \alpha_2 \cdot (1-\beta) + \left[ \frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}} \cdot \beta^2 + \frac{\gamma_0}{1-\bar{\lambda}} \cdot (1-\beta)^2 \right] \cdot Q + (\bar{\lambda} - \beta) \cdot G(B) - \bar{\lambda} \cdot G(A) \quad (\text{eq. 9-22})$$

### Cas 2 : la classe non-informée s'affecte sur les deux routes avec l'égalité des temps moyens

L'égalité des temps moyens engendre :  $B(\bar{\lambda}) = -A(\bar{\lambda}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}(1-\bar{\lambda})} \cdot \beta \cdot Q$ , puis le coût moyen par déplacement pour la classe non-informée :

$$C^N = \bar{t}_1 = \bar{\lambda} \cdot \alpha_1 + (1-\bar{\lambda}) \cdot \alpha_2 + \gamma_0 \cdot Q \quad (\text{eq. 9-23})$$

Le coût moyen par déplacement pour la classe informée :

$$C' = \bar{\lambda} \cdot \alpha_1 + (1-\bar{\lambda}) \cdot \alpha_2 + \gamma_0 \cdot Q - G(A) \quad (\text{eq. 9-24})$$

Le coût moyen par déplacement pour l'ensemble du trafic :

$$\bar{C}_2(\bar{\lambda}) = \bar{\lambda} \cdot \alpha_1 + (1-\bar{\lambda}) \cdot \alpha_2 + \gamma_0 \cdot Q - \beta \cdot G(A) \quad (\text{eq. 9-25})$$

### Cas 3 : la classe non-informée s'affecte sur la route 1 seulement

Nous avons :  $A(\bar{\lambda}) = \alpha_1 - \alpha_2 + \left[ \frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}} \cdot (1-\beta) - \frac{\gamma_0}{1-\bar{\lambda}} \cdot \beta \right] \cdot Q$  et  $B(\bar{\lambda}) = \alpha_1 - \alpha_2 + \frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}} \cdot Q$ , puis le coût moyen par déplacement pour la classe non-informée :

$$C^N = \bar{t}_1 = \alpha_1 + \frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}} \cdot Q - (1-\bar{\lambda}) \cdot (G(B) - G(A)) \quad (\text{eq. 9-26})$$

Le coût moyen par déplacement pour la classe informée :

$$C' = \bar{t}_1 - G(A) = \alpha_1 + \frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}} \cdot Q - (1 - \bar{\lambda}) \cdot G(B) - \bar{\lambda} \cdot G(A) \quad (\text{eq. 9-27})$$

Le coût moyen par déplacement pour l'ensemble du trafic :

$$\bar{C}_3(\bar{\lambda}) = \alpha_1 + \frac{\gamma_0}{\bar{\lambda}} \cdot Q - (1 - \bar{\lambda}) \cdot G(B) + (1 - \bar{\lambda} - \beta) \cdot G(A) \quad (\text{eq. 9-28})$$

En résumant les trois ci-dessus, nous avons la formule analytique de  $\bar{C}(\bar{\lambda})$  comme suivant :

$$\bar{C}(\bar{\lambda}) = \begin{cases} \bar{C}_1(\bar{\lambda}) & \lambda \in [0, \bar{\lambda}_A] \\ \bar{C}_2(\bar{\lambda}) & \lambda \in [\bar{\lambda}_B, \bar{\lambda}_A] \\ \bar{C}_3(\bar{\lambda}) & \lambda \in [\bar{\lambda}_B, 1] \end{cases} \quad (\text{eq. 9-29})$$

Le minimum de  $\bar{C}(\bar{\lambda})$  peut être trouvé en cherchant des minima de chaque sous-fonction  $\bar{C}_1(\bar{\lambda})$ ,  $\bar{C}_2(\bar{\lambda})$  et  $\bar{C}_3(\bar{\lambda})$ . Malheureusement, le problème de minimisation des sous-fonctions ne peut pas résoudre analytiquement. Par contre, il peut être résolu facilement par l'approche numérique.

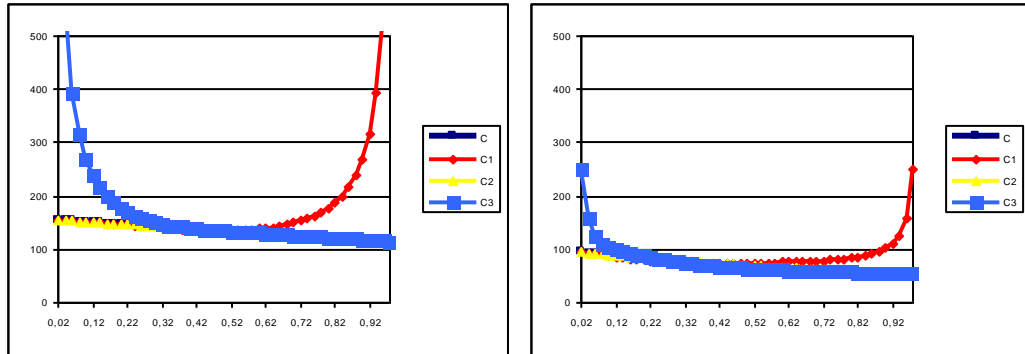


Fig. 9-6 : Fonction  $\bar{C}(\bar{\lambda})$  et ses sous-fonction

En supposant que  $\alpha_1 < \alpha_2$ ,  $\bar{\lambda}^* = 1$  est toujours la solution de ce problème d'optimisation (Fig. 9-6). *A priori*, cette mono-tonalité de la fonction  $\bar{C}(\bar{\lambda})$  résulte de la linéarité des fonctions de temps de parcours.

### 9.3.5. Les indicateurs économiques

A  $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}^* = 1$ , le réseau devient un réseau d'une route unique : l'information routière aux usagers ne donne aucun effet sur ce réseau. Le temps moyen par déplacement pour l'ensemble des usagers :

$$\bar{C}^N = \bar{C}' = \bar{C} = \alpha_1 + \gamma_0 Q \quad (\text{eq. 9-30})$$

#### 9.4.ALLOCATION DYNAMIQUE DE CAPACITE

Supposons que l'opérateur adopte la stratégie « *allocation dynamique* », autrement dit l'opérateur cherche à appliquer une allocation de capacité optimale  $\lambda_{\omega}^*$  pour chaque occurrence rencontrée  $\omega$ . La condition d'optimalité peut s'écrire comme suivant :

**Fig. 9–7 : Relation entre les variables : stratégie d'allocation de capacité fixe**

Notre analyse va suivre l'enchaînement des variables montré dans Fig. 9–7. Nous considérons d'abord l'affectation instantanée des usagers informés à une occurrence donnée et un plan de capacité donné. Cette étape nous permet de formuler la fonction d'objectif du problème d'optimisation de capacité. Dans le deuxième temps, nous allons chercher le plan de capacité optimal  $\lambda_{\omega}^*$  et l'affectation du trafic correspond à ce plan optimal. En fin, les indicateurs économiques seront formulés.

##### 9.4.1.Affectation instantanée des usagers informés

A une occurrence  $\omega$  donnée avec les perturbations brutes  $\zeta_{a\omega}$  et le plan de capacité  $\lambda_{\omega}$  donné, les usagers informés sont supposés d'être affectés par le principe « équilibre de l'utilisateur ». L'affectation de la classe informée est donc un parmi les trois cas suivants :

##### Cas 1 : la classe informée s'affecte sur la route 2 seulement

Sous la condition que le temps de parcours sur la route 2 est inférieur à celui sur la route 1 :  $t_{2\omega}(x_{2\omega}, \lambda_{\omega}) \leq t_{1\omega}(x_{1\omega}, \lambda_{\omega})$ , nous avons :  $x'_{1\omega} = 0$  et  $x'_{2\omega} = q'$  puis  $x_{1\omega} = \bar{x}_1^N$  et  $x_{2\omega} = Q - \bar{x}_1^N$ . Cette condition équivalente à :

$$z \leq A(\lambda) \equiv \alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_0 [\bar{x}_1^N \lambda^{-1} - (Q - \bar{x}_1^N)(1 - \lambda)^{-1}] \quad (\text{eq. 9-31})$$

, dans laquelle :  $z = \zeta_{2\omega} - \zeta_{1\omega}$

Sur le domaine  $[0, 1]$ ,  $A(\lambda)$  décroît de  $+\infty$  à  $-\infty$ , donc :

$$\exists \lambda_A : A(\lambda_A) = z : A(\lambda_\omega) \geq z \Leftrightarrow \lambda_\omega \leq \lambda_A \quad (\text{eq. 9-32})$$

Le temps moyen par déplacement subi par l'ensemble des usagers en fonction de  $\lambda_\omega$  vaut :

$$C_{1\omega}(\lambda_\omega) = (\alpha_1 + \zeta_{1\omega}) \cdot \frac{\bar{x}_1^N}{Q} + (\alpha_2 + \zeta_{2\omega}) \cdot \frac{Q - \bar{x}_1^N}{Q} + \frac{\gamma_0}{\lambda_\omega} \cdot \frac{(\bar{x}_1^N)^2}{Q} + \frac{\gamma_0}{1 - \lambda_\omega} \cdot \frac{(Q - \bar{x}_1^N)^2}{Q} \quad (\text{eq. 9-33})$$

### Cas 2 : la classe informée s'affecte sur les deux routes avec l'égalité des temps

La condition de l'égalité  $t_{1\omega}(\lambda_\omega, x_{1\omega}) = t_{2\omega}(\lambda_\omega, x_{2\omega})$  conduit à :

$$t_{1\omega} = t_{2\omega} = (\alpha_1 + \zeta_{1\omega}) \cdot \lambda_\omega + (\alpha_2 + \zeta_{2\omega}) \cdot (1 - \lambda_\omega) + \gamma_0 \cdot Q \quad (\text{eq. 9-34})$$

Le temps moyen par déplacement subi par un usager :

$$C_{2\omega}(\lambda_\omega) = (\alpha_1 + \zeta_{1\omega}) \cdot \lambda_\omega + (\alpha_2 + \zeta_{2\omega}) \cdot (1 - \lambda_\omega) + \gamma_0 \cdot Q \quad (\text{eq. 9-35})$$

### Cas 3 : la classe informée s'affecte sur la route 1 seulement

Sous la condition que le temps de parcours sur l'arc 1 soit inférieur à celui sur l'arc 2, autrement dit  $x_{1\omega} = \bar{x}_1^N + q^N = Q - \bar{x}_2^N$  et  $x_{2\omega} = \bar{x}_2^N$  sous la condition :  $t_{2\omega}(\lambda_\omega, \bar{x}_2^N) \geq t_{1\omega}(\lambda_\omega, Q - \bar{x}_2^N)$  qui est équivalente à :

$$z \geq B(\lambda_\omega) \equiv \alpha_1 - \alpha_2 + \left[ \frac{\gamma_0}{\lambda_\omega} \cdot (Q - \bar{x}_2^N) - \frac{\gamma_0}{1 - \lambda_\omega} \cdot \bar{x}_2^N \right] \quad (\text{eq. 9-36})$$

Sur le domaine  $[0, 1]$ ,  $B(\lambda)$  décroît de  $+\infty$  à  $-\infty$  dont :

$$\exists \lambda_B : B(\lambda_B) = z : B(\lambda_\omega) \leq z \Leftrightarrow \lambda_\omega \geq \lambda_B \quad (\text{eq. 9-37})$$

Dans ce cas, le temps moyen subi par un usager vaut :

$$C_{3\omega}(\lambda_\omega) = (\alpha_1 + \zeta_{1\omega}) \cdot \frac{Q - \bar{x}_2^N}{Q} + (\alpha_2 + \zeta_{2\omega}) \cdot \frac{\bar{x}_2^N}{Q} + \frac{\gamma_0}{\lambda} \cdot \frac{(Q - \bar{x}_2^N)^2}{Q} + \frac{\gamma_0}{1 - \lambda} \cdot \frac{(\bar{x}_2^N)^2}{Q} \quad (\text{eq. 9-38})$$

#### 9.4.2. Allocation de capacité dynamiquement optimale

Conditionnellement à  $\lambda_\omega$  par rapport à  $\lambda_A$  et  $\lambda_B$ , nous avons la fonction du temps par déplacement  $C_\omega$  pour l'occasion  $\omega$  :

$$C_\omega(\lambda_\omega) = \begin{cases} C_{1\omega}(\lambda_\omega) & \lambda \in [0, \lambda_A] \\ C_{2\omega}(\lambda_\omega) & \lambda \in [\lambda_A, \lambda_B] \\ C_{3\omega}(\lambda_\omega) & \lambda \in [\lambda_B, 1] \end{cases} \quad (\text{eq. 9-39})$$

Nous devons trouver l'allocation de capacité optimale  $\lambda_\omega^*$  qui minimise le temps moyen par déplacement  $C_\omega(\lambda_\omega)$  à l'occurrence  $\omega$  global. Il consiste à chercher ses minima sur trois segments  $[0, \lambda_A]$ ,  $[\lambda_B, \lambda_A]$ , et  $[\lambda_B, 1]$ , puis le minimum parmi les minima.

Comme la fonction  $C_{1\omega}(\lambda_\omega)$  est convexe a un minimum unique sur  $[0, 1]$  à  $\lambda_\omega = \lambda_A^* \equiv \bar{x}_1^N / Q$ . De plus,  $A(\lambda_A^*) = \Delta\alpha \equiv \alpha_1 - \alpha_2$ , donc :  $\lambda_A^* \in [0, \lambda_A] \Leftrightarrow z \leq \Delta\alpha$ . Nous avons :

$$\min_{[0, \lambda_A]} C_{1\omega}(\lambda_\omega) = \begin{cases} C_{1\omega}(\lambda_A^*) & \text{si } z \leq \Delta\alpha \\ C_{1\omega}(\lambda_A) & \text{si } z \geq \Delta\alpha \end{cases} \quad (\text{eq. 9-40})$$

La fonction  $C_{2\omega}(\lambda_\omega)$  soit croissante, soit décroissante sur  $[0, 1]$  conditionnellement à  $z - \Delta\alpha$

$$\min_{[\lambda_A, \lambda_B]} C_{2\omega} = \begin{cases} C_{2\omega}(\lambda_A) & \text{si } z \leq \Delta\alpha \\ C_{2\omega}(\lambda_B) & \text{si } z \geq \Delta\alpha \end{cases} \quad (\text{eq. 9-41})$$

La fonction  $C_{3\omega}(\lambda_\omega)$  est convexe et a un minimum unique sur  $[0, 1]$ . De plus,  $B(\lambda_B^*) = \Delta\alpha$ , donc :  $\lambda_B^* \in [\lambda_B, 1] \Leftrightarrow z \geq \Delta\alpha$ . Nous avons :

$$\min_{[\lambda_B, 1]} T_\omega = \begin{cases} T_\omega^3(\lambda_B) & \text{if } z \leq \Delta\alpha \\ T_\omega^3(\lambda_B^*) & \text{if } z \geq \Delta\alpha \end{cases} \quad (\text{eq. 9-42})$$



Résumons les trois fonctions, conditionnement à  $z$  :

$z$	<i>Minima</i>	<i>Minimum</i>	$\lambda_{\omega}^*$	<i>Affectation</i>
$z \leq \Delta\alpha$	$\min_{[0, \lambda_A]} C_{\omega} = C_{1\omega}(\lambda_A^*)$ $\min_{[\lambda_A, \lambda_B]} C_{\omega} = C_{2\omega}(\lambda_A)$ $\min_{[\lambda_B, 1]} C_{\omega} = C_{3\omega}(\lambda_B)$	$\min_{[0, 1]} C_{\omega} = C_{1\omega}(\lambda_A^*)$	$\lambda_{\omega}^* = \lambda_A^*$	$x'_{1\omega} = 0,$ $x'_{2\omega} = q'$
$z \geq \Delta\alpha$	$\min_{[0, \lambda_A]} C_{\omega} = C_{1\omega}(\lambda_A)$ $\min_{[\lambda_A, \lambda_B]} C_{\omega} = C_{2\omega}(\lambda_B)$ $\min_{[\lambda_B, 1]} C_{\omega} = C_{3\omega}(\lambda_B^*)$	$\min_{(0, 1)} C_{\omega} = C_{3\omega}(\lambda_B^*)$	$\lambda_{\omega}^* = \lambda_B^*$	$x'_{1\omega} = q',$ $x'_{2\omega} = 0$

Tab. 9-1 : Les minima et minimum en fonction de  $z$

#### 9.4.3. Affectation moyenne des usagers non-informés et informés

La formule générale du temps moyen de la route 1 :

$$\bar{t}_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \alpha_1 + \frac{\gamma_0}{\lambda_{\omega}^*} \cdot x_{1\omega} + \zeta_{1\omega} \right) dFz \quad (\text{eq. 9-43})$$

Comme avoir analysé ci-dessus, les valeurs de  $x_{1\omega}$  et  $\lambda_{\omega}^*$  dépend de la valeur de  $z$  :

- si  $z \leq \Delta\alpha$ , alors :  $x_{1\omega} = \bar{x}_1^N$  et  $\lambda_{\omega}^* = \bar{x}_1^N / Q$
- si  $z > \Delta\alpha$ , alors :  $x_{1\omega} = Q - \bar{x}_2^N$  et  $\lambda_{\omega}^* = (Q - \bar{x}_2^N) / Q$

Cela conduit à :

$$\bar{t}_1 = \int_{-\infty}^{\Delta\alpha} (\alpha_1 + \gamma_0 \cdot Q + \zeta_{1\omega}) dFz + \int_{\Delta\alpha}^{+\infty} (\alpha_1 + \gamma_0 \cdot Q + \zeta_{1\omega}) dFz \quad (\text{eq. 9-44})$$

Donc :  $\bar{t}_1 = \alpha_1 + \gamma_0 \cdot Q \quad (\text{eq. 9-45})$

.De même manière, nous avons :  $\bar{t}_2 = \alpha_2 + \gamma_0 \cdot Q \quad (\text{eq. 9-46})$

Supposons que  $\alpha_1 \leq \alpha_2$ . Cela conduit au fait que la classe non-informée est affectée sur la route 1 seulement :

$$\bar{x}_1^N = q^N \text{ et } \bar{x}_2^N = 0 \quad (\text{eq. 9-47})$$

L'affectation de la classe informée dépend seulement de la valeur relative de  $z$  à  $\Delta\alpha$ , donc :

$$\bar{x}_1' = \int_{-\infty}^{+\infty} x'_{a\omega} dFz = \int_{-\infty}^{\Delta\alpha} 0 \cdot dFz + \int_{\Delta\alpha}^{+\infty} q' dFz \quad (\text{eq. 9-48})$$

, donc :  $\bar{x}_1' = q'(1 - F(\Delta\alpha)) \text{ et } \bar{x}_2' = q'F(\Delta\alpha)$  (eq. 9-49)

#### 9.4.4. Indicateurs économiques

Comme les chapitres précédents, nous évaluons les impacts de l'information sur le trafic et sur les deux classes d'utilisateurs :

- Le temps moyen par déplacement pour la classe informée :

$$\bar{C}' = \frac{1}{q'} \int_{-\infty}^{+\infty} (x'_{1\omega} t_{1\omega} + x'_{2\omega} t_{2\omega}) dFz \quad (\text{eq. 9-50})$$

Si  $z \leq \Delta\alpha$ , la classe informée est affectée sur la route 2, sinon la route 1, donc :

$$\bar{C}' = \int_{-\infty}^{\Delta\alpha} (\alpha_2 + \gamma_0 \cdot Q + \zeta_{2\omega}) dFz + \int_{\Delta\alpha}^{+\infty} (\alpha_1 + \gamma_0 \cdot Q + \zeta_{1\omega}) dFz \quad (\text{eq. 9-51})$$

Cette formule peut être réduite à :

$$C'_{DC} = \alpha_1 + \gamma_0 \cdot Q - G(\Delta\alpha) \quad (\text{eq. 9-52})$$

- Le temps moyen par déplacement pour la classe non-informée :

$$C^N_{DC} = \frac{1}{q^N} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} (\bar{x}_1^N \cdot t_{1\omega} + \bar{x}_2^N \cdot t_{2\omega}) dFz = \alpha_1 + \gamma_0 \cdot Q \quad (\text{eq. 9-53})$$

- Le temps moyen par déplacement par usager du réseau :

$$\bar{C}_{DC} = \beta \cdot \bar{C}' + (1 - \beta) \cdot \bar{C}^N = \alpha_1 + \gamma_0 \cdot Q - \beta \cdot G(\Delta\alpha) \quad (\text{eq. 9-54})$$

- Le gain d'être équipé :

$$\Gamma_{dc} = \bar{C}^N - \bar{C}' = G(\Delta\alpha) \quad (\text{eq. 9-55})$$

Car  $\bar{t}_1$  et  $G(\Delta\alpha)$  est indépendant de  $\beta$ , le temps moyen par déplacement pour la classe non-informé, la classe informé et le gain d'être équipé sont toujours constant. Le temps moyen par déplacement par usager du réseau diminue en fonction de  $\beta$ .

## 9.5.COMPARAISON DES STRATEGIES D'ALLOCATION DE CAPACITE

Nous comparons les stratégies d'allocation de capacité d'abord par une analyse analytique en §9.5.1. Puis, une investigation numérique en §9.5.2 permet de visualiser les effets sous de différents niveaux de diffusion de l'information ainsi que de différents niveaux de demande.

### 9.5.1.Analyse analytique

Indicateur	Allocation fixe	Allocation dynamique
Temps moyen de la classe non-informée: $\bar{C}^N$	$\alpha_1 + \gamma_0 Q$	$\alpha_1 + \gamma_0 Q$
Temps moyen de la classe informée : $\bar{C}'$	$\alpha_1 + \gamma_0 Q$	$\alpha_1 + \gamma_0 Q - G(\Delta\alpha)$
Temps moyen de l'ensemble : $\bar{C}$	$\alpha_1 + \gamma_0 Q$	$\bar{t}_1 - \beta G(\Delta\alpha)$
Gain d'être équipé : $\Gamma$	0	$G(\Delta\alpha)$

**Tab. 9-2 : Temps moyens et gain sous différentes stratégies**

Sous la stratégie « allocation fixe », l'allocation de capacité optimale est à  $\beta=1$ , à savoir maximiser la capacité de la route la plus courte. Cet effet est dû à l'hypothèse de la linéarité des fonctions du temps de parcours.

La diffusion de l'information et de l'allocation dynamique de capacité ne donne pas d'influence sur la classe non-informée. Pour la classe informée, la stratégie DC induit un gain d'équipement constant  $G(\Delta\alpha)$  qui ne dépend que des paramètres du réseau. En plus, la performance du système s'améliore avec l'augmentation du taux d'équipement.

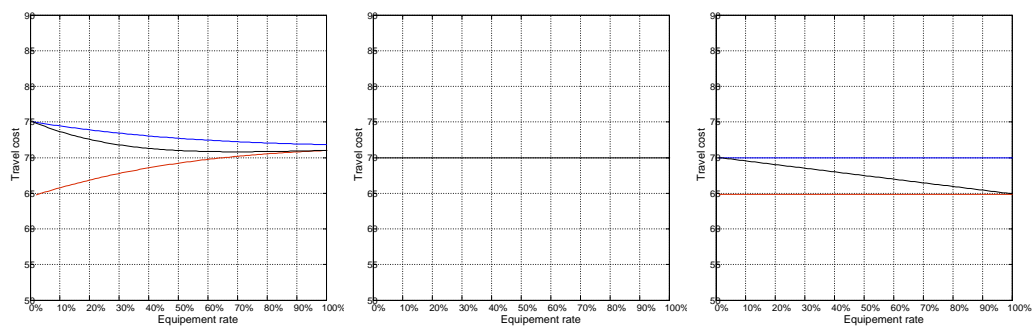
### 9.5.2.Investigation numérique

Nous comparons les résultats numériques données par trois stratégies d'allocation de capacité adoptées :

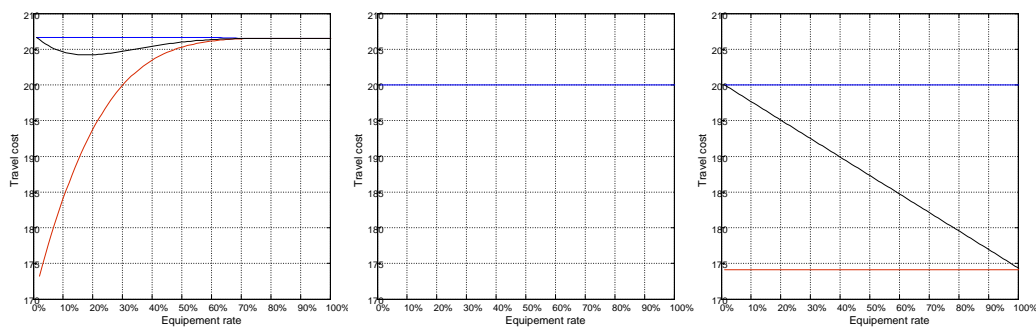
- Sans allocation de capacité : un réseau élémentaire de deux routes présenté précédemment avec les paramètres suivants :  $\alpha_1 = 40$ ,  $\gamma_1 = 2$ ,  $\alpha_2 = 80$ ,  $\gamma_2 = 1$
- Allocation de capacité fixe :  $\alpha_1 = 40$ ,  $\alpha_2 = 80$  et  $\gamma_0 = 1.5$

- Allocation dynamique de capacité :  $\alpha_1 = 40$ ,  $\alpha_2 = 80$  et  $\gamma_0 = 1.5$
- Demande : volume de demande faible  $Q=10$  et volume de demande élevé :  $Q=100$ .

La Fig. 9–8 illustre la situation sans optimisation d'allocation de capacité et les deux stratégies d'optimisation d'allocation de capacité fixe et dynamique. L'optimisation statique de l'allocation de capacité porte évidemment certain avantage par rapport à configuration du réseau non-optimisée. Pour notre cas d'école, la stratégie d'optimisation statique rend la totalité de capacité à la route la plus courte. Cela engendre le fait que la diffusion de l'information ne donne pas d'influence sur le trafic (car tous les usagers s'affectent sur une seule route).



**Fig. 9–8 : Trois stratégies : (a) « sans allocation de capacité », (b) allocation fixe et (c) variable à faible demande  $Q=10$**



**Fig. 9–9 : Trois stratégies : (a) « sans allocation de capacité », (b) allocation fixe et (c) variable à faible demande  $Q=100$**

L'optimisation dynamique de l'allocation de capacité contribue encore mieux à améliorer la performance du système. En plus la diffusion de l'information et l'optimisation de l'allocation de capacité donne conjointement des effets positifs sur la performance globale du système. Plus l'information est diffusée plus la performance du système est amélioré. En plus, sous la stratégie dynamique ne donne pas d'effet sur le coût de déplacement moyen pour la classe non-informé (ni positif, ni négatif). Le gain d'être équipé est toujours constant – dépendent de la différence entre les deux temps de parcours à vide sur deux routes.

## 9.6.CONCLUSION DU CHAPITRE

Le chapitre 9 a élargi le cadre de modélisation de l'information dynamique présenté au chapitre 6 par la modélisation de deux stratégies d'optimisation de l'allocation de capacité. La stratégie statique cherche une configuration fixe du réseau, optimale statiquement en matière d'allocation de capacité sur l'ensemble des occurrences. La stratégie dynamique adapte dynamiquement l'allocation de capacité aux perturbations survenues.

Par rapport à la stratégie statique, la stratégie dynamique porte des avantages:

- Elle contribue à améliorer la performance du système par les effets positifs conjoints de la diffusion de l'information et l'allocation dynamique de capacité.
- Elle profite les usagers équipés d'un gain constant, dépendent des paramètres  $\alpha_a$
- Elle ne donne pas d'effet négatif sur les usagers non-informés.

Cependant, notre cadre de modélisation simpliste porte certaines limites :

- D'abord la représentation linéaire du courbe débit-vitesse engendre le fait que les effets de la diffusion de l'information sont muets sous la stratégie statique. Cela pourra conduire probablement à une sous-évaluation des effets de l'information dynamique sous la stratégie statique. Le traitement du modèle avec une modélisation de l'écoulement plus fine peut être nécessaire, à savoir celle de BPR ou une modélisation dynamique de l'écoulement entre autres.
- La représentation du contrôle de trafic reste encore très grossière. En réalité, l'allocation de capacité est paramétrée par diagramme de feux. L'intégration des paramètres de contrôle de feux ou de contrôle de voies réversibles au modèle peut le rendre plus fidèle et réaliste.



## Chapitre 10. Conclusion générale

---

Ce chapitre va donner dans un premier temps une vue d'ensemble des implications de cette thèse de doctorat §10.1. En suite, la section §10.2 va discuter les limites de notre travail ainsi que proposer des pistes de développement.

### 10.1.RECAPITULATION

Succinctement, nous avons conçu un cadre de modélisation destiné à analyser l'information routière aux usagers, ses effets sur le trafic et ses interactions avec d'autres mesures d'exploitation dans un système de gestion du trafic complexe. Nous récapitulons non seulement la formation des hypothèses et le traitement de différents cas d'application mais aussi les deux premières parties du mémoire où se trouvent le développement des problématiques et la revue de littérature.

#### 10.1.1.Description des services d'information routière

La partie I a consacré à une analyse sur le service d'information routière aux usagers et son rôle dans l'ensemble d'un système de gestion d'exploitation routière.

Les services d'information routière sont diffusés sous une variété de formes : carte routière, panneau de signalisation, panneau à messages variables, médias publics ou équipement nomade personnel. Les supports traditionnels comme panneau de signalisation, carte routière, etc. ne peuvent diffuser que de l'information statique concernant des éléments invariables du réseau routier, tels que panneau de signalisation, carte routière, etc. En général, les supports électroniques, tels que panneau à messages variables, radio trafic, PDA, etc., sont capables de diffuser de l'information dynamique.

Cependant, la qualité « statique » ou « dynamique » de l'information routière est étroitement liée à la procédure de recueillement et de traitement de données. Pendant les services d'information statique peut être produits et diffusés par les fournisseurs indépendants. Les services d'information dynamique s'intègrent aux actions d'exploitation du trafic. Le recueillement et le traitement des données de trafic en temps réel permettent à l'exploitant d'une part d'adapter des mesures de gestion du trafic en temps réel et d'autre part de partager de l'information dynamique aux usagers. L'information qualifiée dynamique doit refléter les conditions effectives du trafic à la circonstance confrontée.

Dans un système d'exploitation du trafic, les services d'information routière aux usagers jouent un double rôle : pour les usagers, l'information routière leur aide

dans à choisir la bonne option de déplacement et à améliorer le confort de conduite ; pour l'exploitant, l'information routière sert à une mesure de gestion du trafic.

### **10.1.2.Revue de littérature sur les comportements des usagers**

Au lieu de mener d'une enquête sur les comportements des automobilistes, nous avons identifié les comportements types, en regardant les études empiriques publiées dans la littérature.

Avant d'effectuer un déplacement, l'utilisateur-automobiliste choisit son itinéraire, son horaire de départ, et éventuellement sa destination en comparant les options de déplacement disponibles à lui. Chaque option de déplacement est considérée par un nombre d'attributs : temps de parcours, distance, niveau de congestion, qualité de revêtement, paysage, etc., en liant au contexte de déplacement : contrainte d'itinéraire, contrainte d'horaire d'arrivée, etc. Cependant, l'attribut le plus important pour le choix de déplacement, en particulier pour le choix d'itinéraire, est toujours le temps de parcours.

Les études empiriques publiées dans la littérature ont montré également que la capacité du traitement d'information des usagers est parfois limitée par son effort cognitif et sa connaissance de la topologie et de l'état du réseau qui est fortement corrélée à l'information dont il dispose. Les usagers informés ont tendance de changer d'itinéraire et/ou d'horaire de départ (par rapport leur option habituelle) plus fréquemment. Cela est expliqué par le fait que les usagers informés, grâce à l'information reçue, prennent en compte les perturbations éventuelles dans leur choix.

### **10.1.3.Revue de littérature sur les modèles existants**

Nous avons établi un état de l'art des modèles élémentaires<sup>1</sup> de choix d'itinéraire existant : du type déterministe au type stochastique. Les modèles déterministes introduits par (Wardrop, 1952) suppose que les usagers ont une connaissance parfaite du réseau et de l'état du trafic. Cette hypothèse est peu vraisemblable par rapport à la réalité où les conditions du trafic changent, certains usagers ne connaissent pas exactement les conditions de circulation auxquelles ils sont confrontés. L'imparfait de la connaissance des usagers lors de leur choix d'itinéraire fait l'objet de nombreux travaux de recherche : une des solutions est d'utiliser des modèles stochastiques en interprétant les variables aléatoires comme l'incertitude des usagers. Nombreux travaux successifs cherchent à modéliser les effets de l'information routière par une approche de segmentation : les usagers informés connaissent parfaitement les conditions du trafic pendant que les usagers non-informés choisissent leur itinéraire avec incertitude. Cette hypothèse se modélise par un modèle multi-classe combiné du

---

<sup>1</sup> En fait, nous n'avons pas investi sur l'aspect algorithmique des problèmes d'affectation.



modèle déterministe représentant le comportement de la classe informée et du modèle stochastique représentant le comportement de la classe non-informée. Cette approche semble inexacte car le rapport entre l'information dynamique et la dynamique du réseau n'est pas identifié.

#### **10.1.4. Modélisation des effets de l'information dynamique**

Nous avons développé un cadre de modélisation rigoureux destiné à analyser les effets de la diffusion de l'information dynamique aux usagers. Ce modèle est innovant pour plusieurs raisons.

*Primo*, nous avons bien distingué les congestions de différentes sources : la congestion récurrente par la fonction débit-temps et les perturbations exogènes par une variable aléatoire. Cette distinction est cruciale pour modéliser des effets de l'information dynamique car les perturbations exogènes sont la cause principale de la variation des conditions de circulation – la raison d'être du service d'information dynamique.

*Secundo*, nous avons bien distingué les deux stratégies de décision des usagers en fonction de l'information dont ils disposent. Comme les usagers informés ont une connaissance parfaite de la présence d'une perturbation quelconque et puis de l'état du trafic, ils réagissent de manière instantanée aux perturbations. En absence de l'information dynamique, les usagers non-informés prennent de décision en fonction de leur expérience qui est capitalisée lors de leurs déplacements précédents.

*Tertio*, considérant les deux échelles temporelles liées aux perturbations exogènes et à la congestion ainsi que liées au comportement des usagers informés et les usagers non-informés, l'affectation du trafic a été formulée par un problème d'équilibre bi-niveau : à court terme, le choix d'itinéraire des usagers informés en fonction des conditions perturbées du trafic, à long terme, le choix d'itinéraire des usagers non-informés en fonction des conditions moyennes du trafic. Chaque niveau d'équilibre impose des contraintes sur l'autre.

Les effets de l'information dynamique ont été analysés par jeu d'indicateurs économiques. Les indicateurs de coût (le coût par déplacement ressenti par un usager informé, un usager non-informé ou un usager en général) indiquent les impacts sur chaque classe et la performance globale du système. Les indicateurs gain indiquent la motivation des acteurs, notamment pour un usager individuel sur la décision d'être équipé ou non ou pour l'exploitant dans sa stratégie de diffusion de l'information.

#### **10.1.5.Contenus coopératifs et optimisation du trafic**

Les 16 contenus coopératifs de l'information (autrement interprétés comme les motifs de comportement coopératif) allant de celui totalement égoïste, correspondant à l'équilibre de l'utilisateur, à celui totalement coopératif, correspondant à l'optimum du système, ont été intégrés à notre cadre de modélisation par l'utilisation des notions « pseudo-coût » et « pseudo-équilibre ».

Cette modélisation nous permet d'abord de déterminer l'optimum du système en présence de l'information qui peut être considéré comme un état de référence, la marge de manœuvre pour les actions d'exploitation du trafic.

En suite, nous avons analysé les différentes stratégies d'information, liées au contenu coopératif, peuvent être adoptées par l'exploitant. Par les formules analytiques et les investigations numériques, nous avons montré que l'information dynamique avec le contenu « neutre », à savoir l'information sans contenu coopératif imposé par l'exploitant, ne contribue toujours à améliorer la performance du système. En plus, la diffusion excessive de l'information dynamique neutre peut dégrader la performance du système. L'implantation de l'optimum du système par l'information dynamique aux usagers informés et par l'information statique aux usagers non-informés peut contribuer nettement à améliorer la performance du système mais elle est difficilement acceptable car certains usagers doivent subir des déplacements plus coûteux. Nous avons proposé une stratégie d'information avec le contenu coopératif uniquement entre les usagers informés qui est à la fois performante pour l'exploitant et équitable pour les usagers.

#### **10.1.6.Effets conjoints des mesures d'exploitation**

Pour l'objectif d'analyser les interactions entre la diffusion de l'information dynamique du trafic et d'autres mesures d'exploitation, nous avons intégré successivement la tarification de la congestion et l'allocation de capacité à notre cadre de modélisation : chaque mesure d'exploitation est modélisée par l'introduction d'une variable d'action supplémentaire ; puis plusieurs stratégies d'optimisation sont formulées.

Les traitements analytiques et les investigations numériques ont montré la complémentarité de l'information dynamique et des mesures de gestion dynamique du trafic : en complément de la contribution propre de chacune, elles génèrent également des effets conjoints permettant d'optimiser encore de plus la performance du système.

## **10.2.LIMITES DU TRAVAIL ET PISTES DE DEVELOPPEMENT**

Afin de rendre totalement analytiques nos traitements, nous avons retenu des hypothèses simplificatrices pour la représentation de l'offre, de la demande, de l'information dynamique ainsi que des mesures de gestion. Cette section est pour l'objectif de discuter les limites de notre travail, en suite, de proposer des pistes de développement pour les travaux suivants.

### **10.2.1.Représentation de l'offre**

#### **Phénomène de congestion**

Comme avoir discuté en §6.2.1, l'hypothèse de linéarité utilisée pour les fonctions débit-temps ne correspond à des formes légères de congestion. Nous pouvons améliorer la représentation de la congestion récurrente par l'utilisation des fonctions débit-temps non-linéaire, e.g. la fonction BPR bien connue. Une discussion approfondie sur les différentes formes de la relation débit-temps sera trouvée dans (Leurent, 2002).

Par ailleurs, le régime saturé de la congestion sera mieux représenté dans un modèle d'affectation dynamique du trafic. Bien entendu, le passage de statique à dynamique à ajuster les autres hypothèses (cf. §10.2.5).

#### **Perturbations exogènes**

La modélisation des perturbations exogènes comme variable aléatoire est soumise à plusieurs contraintes : indépendance des variables aléatoires entre deux routes, homoskedasticité, additivité à la fonction débit-temps et distribution gaussienne dans la plupart des traitements.

En apparence, hypothèse gaussienne ne correspond pas aux perturbations routières qui ne génèrent que les effets négatifs. Cependant, nous avons montré au chapitre 6 que n'y a pas de différence significative au niveau les résultats donnés entre l'hypothèse gaussienne avec l'hypothèse Bernoulli-exponentiel.

Sur un réseau élémentaire de deux routes parallèles, la dépendance et la hétéroskedasticité des variables aléatoires peuvent être traitées facilement sous l'hypothèse gaussienne par une adaptation spécifique de la différence des perturbations des deux routes.

Par ailleurs, nous pouvons relaxer l'hypothèse de l'additivité où les perturbations n'affectent pas la capacité de la section en établissant le rapport entre la valeur de la perturbation et la sensibilité à la congestion.

## 10.2.2.Représentation de la demande

### Profil temporel de demande

Nous avons adopté une hypothèse que le volume de demande  $Q$  est invariable pour toutes les occurrences  $\omega$  dans l'ensemble  $\Omega$ . Si chaque occurrence correspond à un jour et l'ensemble  $\Omega$  correspond à une longue période de plusieurs mois ou d'une année. Cette hypothèse signifie que le volume demande ne varie pas.

En réalité, le volume de demande change de manière régulière selon les périodes de temps en fonction du rythme des activités socio-économiques générant la demande. Le rythme de variation peut être hebdomadaire sur le réseau périurbain ou annuel sur le réseau interurbain (cf. Chapitre 3). On peut modéliser cette variation de la demande en introduisant un profil temporel de la demande. Il reste à y adapter la représentation des perturbations aléatoires et puis la formation de l'équilibre du trafic.

### Préférences individuelles et raisonnement économique

Le choix de l'utilisateur a été modélisé par un raisonnement purement économique sans prendre en compte les préférences individuelles ainsi que l'inexactitude du traitement de choix effectué par l'utilisateur.

Il est nécessaire d'intégrer des préférences individuelles au modèle de choix. Cela peut se faire par une segmentation discrète : on divise la demande en plusieurs segments, chaque segment a son propre modèle de choix en fonction de ses préférences ; une segmentation continue : on introduit une variable représentant la préférence de choix des usagers, par exemple, modèle Prix-Temps (cf. §5.4 )

Par ailleurs, l'inexactitude de la décision de choix de l'utilisateur ou la limite de la perception des options de choix sur un grand réseau, notamment pour la classe non-informée, peut se modéliser par un modèle stochastique ou modèle stochastique avancé (cf. §5.5 et §5.6)

### Phénomène d'apprentissage des usagers non-informés

Nous avons modélisé l'état d'équilibre bi-niveau du trafic. Il s'agit uniquement un état d'équilibre final où les usagers informés et les usagers non-informés se trouvent dans un état d'équilibre de leur classe. Plusieurs études dans la littérature ont montré qu'il y a une dynamique de choix de déplacement des usagers en situation où leur connaissance sur l'état du trafic et les conditions de trafic : les usagers basculer entre les différentes options de choix afin de capitaliser de l'information. L'état du trafic se converge vers l'état d'équilibre

qu'après une longue procédure itérative (cf. Chapitre 4). Il existe plusieurs approches pour modéliser ce phénomène (§5.7).

### **Choix d'horaire de départ/mode/destination**

Nous avons modélisé uniquement le choix d'itinéraire. En réalité, les usagers choisissent également leur horaire de départ, leur mode de transport ou leur destination. Pour l'instant, notre modélisation statique est incapable d'appréhender le choix d'horaire de départ.

Cependant, le choix de départ peut être intégré dans cadre de modélisation dynamique. Le problème de choix d'horaire de départ a été bien traité analytiquement dans une modèle d'affectation dynamique, type goulot spatial (Leurent et Wagner, 2009), dans ce modèle, il y a une seule classe d'usagers ayant une connaissance parfait sur les conditions du trafic.

### **Attributs considérés pour une option de choix**

Il est supposé dans notre modélisation que le temps de parcours est l'attribut considéré pour le choix de déplacement des usagers. Les usagers peuvent considérer d'autres attributs pour leur décision de choix, par exemple : le beau paysage, la visibilité de l'itinéraire, la qualité du revêtement, ou la fiabilité des temps de parcours, etc. (cf. Chapitre 3 pour les modèles comportementaux, et (de Palma et Picard, 2005) entre autres pour les modèles de risque et (Ramming, 2002) pour la prise en compte de divers attributs).

## **10.2.3.Représentation des services d'information**

### **Crédibilité de l'information**

Nous avons supposé que la qualité de l'information diffusée aux usagers est parfaite : l'information ou le conseil d'itinéraire communiqué à l'utilisateur correspond exactement aux conditions de circulation qu'il sera confronté lors de la réalisation de son déplacement. En réalité, l'information diffusée n'est jamais totalement crédible. Malgré l'avancement des technologies de recueillement et de traitement de données, l'exploitant n'est jamais capable d'appréhender toutes les circonstances survenues car le déplacement se réalise pendant certaine durée de temps pendant laquelle il y aurait probablement des perturbations imprévisibles, le traitement d'information est fait souvent de manière agrégée donc la personnalisation pour chaque individu est limitée.

La crédibilité de l'information est souvent modélisée en introduisant la notion « obéissance de l'utilisateur » : le taux d'obéissance est le pourcentage des usagers informés qui suivent correctement l'information reçue.

### **Plusieurs paniers d'information et accessibilité**

Nous n'avons modélisé que deux niveaux d'accessibilité à l'information : informé ou non-informé. Nous pouvons raffiner la représentation de l'information des classes d'utilisateurs en distinguant plusieurs formes d'information, et, parmi les utilisateurs, plusieurs « paniers » d'équipement donnant accès à certaines formes d'information. Dans cette recherche, les enjeux essentiels de modélisation tiennent à la nature de chaque forme d'information (notamment selon le média, les lieux de disponibilité, la qualité prédictive) et au mode d'usage d'un ensemble d'informations par un utilisateur particulier – qui ne peut allouer qu'une part modérée de sa charge mentale à la tâche d'intégrer les informations.

### **Tarification des services d'information et équilibre du marché**

Nous n'avons pas encore pris en compte les tarifs des services d'information proposés aux utilisateurs. Pour le choix d'être équipé, l'utilisateur compare le gain d'être équipé et le frais qu'il doit payer au fournisseur d'information. Ce comportement des utilisateurs du service d'information peut être modélisé par un modèle de pénétration au marché ((Lo et Szeto, 2004) et (Lo et Szeto, 2004)).

Comme l'usage de l'information, dans le cas du contenu « neutre », peut générer des coûts externes. Il est intéressant à voir quelle politique tarifaire doit être retenue ? Quel est le tarif optimal au point de vue de la société ? Ce problème d'optimisation va ajouter à notre modèle d'affectation bi-niveau d'équilibre un troisième niveau d'équilibre ou un quatrième niveau d'équilibre en présence d'une autre mesure d'exploitation.

### **Multiples sources d'information et concurrence entre fournisseurs**

Nous avons supposé que l'exploitation du réseau routière est également le fournisseur d'information routière. Lors de la privatisation du marché des services d'information routière, l'exploitant du réseau n'est plus le seul fournisseur d'information.

Donc, il a effectivement la concurrence entre les différents fournisseurs d'information. Il est intéressant de modéliser les comportements des fournisseurs sur le marché. Cette question a été traitée de manière abstraite dans (Malchow, Kanafani *et al.*, 1996), (Malchow, Kanafani *et al.*, 1997) et (Chorus, Molin *et al.*, 2006).

Par ailleurs, il est également intéressant de modéliser le traitement et la réaction des utilisateurs face aux informations de différentes sources. A priori, une moyenne pondérée peut être la combinaison des sources. Cette approche a été utilisée par (Engelson, 2000) dans une modélisation de la combinaison des effets donnés par de l'information diffusé via PMV et celle diffusé via radio trafic.

#### **10.2.4.Représentation des mesures d'exploitation**

Les mesures d'exploitation du trafic ont été modélisées de manière relativement abstraite. L'allocation de capacité peut correspondre à plusieurs actions d'exploitation en réalité, par exemple le contrôle d'accès, le contrôle de cycle de feux à intersection ou l'application de voies réversibles. Il faut donc raffiner la variable d'action ( $\lambda$ ) pour chaque cas particulier: les deux premières cas conviennent à un problème d'optimisation continue et le dernier convient à un problème d'optimisation discrète.

#### **10.2.5.Passage en affectation dynamique ou/et en grand réseau**

##### **De l'affectation statique à l'affectation dynamique**

La reformulation de notre jeu d'hypothèses en affectation dynamique permet d'améliorer la modélisation en plusieurs aspects : l'écoulement du trafic et le phénomène de congestion, le choix d'horaire de départ, le raffinement des mesures de gestion dynamique du trafic, etc. Cependant, ce passage exige d'ajuster plusieurs hypothèses : d'abord, l'aspect spatio-temporel de la structure probabiliste des perturbations, l'équilibre dynamique du trafic, etc.

##### **Du cas d'école à un grand réseau**

Les applications présentées dans ce mémoire restent toujours à un cas d'écoulement sur un réseau élémentaire. Pour le passage du réseau de deux arcs en réseau général, il faut résoudre plusieurs problèmes : un algorithme de chargement du trafic, équilibre du trafic en réseau, et la combinaison séquentielle des perturbations en arcs. Cette dernière peut être résolue par une méthode d'approximation (Clark, 1961).

En tout cas, nous recommandons de traiter les deux dernières problématiques par une approche numérique en utilisant un outil de simulation existant, tel que LADTA<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Lumped Analytical Dynamic Traffic Assignment : un modèle d'affectation dynamique du trafic conçu par F. Leurent ; un prototype développé par H.D. Mai ; et le simulateur LADTA Toolkit développé par V. Aguiléra





## Bibliographie

---

- Abdel-Aty, M. et Y. Huang (2004). "Exploratory Spatial Analysis of Expressway Ramps and its Effect on Route Choice." Journal of Transportation Engineering **130**(1): 104-112.
- Abdelfatah, A. et H. Mahmassani (1998). "System Optimal Time-Dependent Path Assignment and Signal Timing in Traffic Network." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1645**(-1): 185-193.
- Abraham, C. et R. Coquand (1961). "La répartition du trafic entre itinéraires concurrents, réflexions sur le comportement des usagers, application au calcul des péages." Revue Générale des Routes et Aérodrômes **357**: 57-76.
- Adler, J. L. (2001). "Investigating the learning effects of route guidance and traffic advisories on route choice behavior." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **9**(1): 1-14.
- Adler, J. L., M. G. McNally, *et al.* (1993). Interactive Simulation for Modeling Dynamic Driver Behavior in Response to ATIS. W. Paper, The University of California, Transportation Center.
- Ai-Ping, L. et G. Zi-You (2005). "Research on combined dynamic traffic assignment and signal control." Acta Automatica Sinica **31**(5): 727-736.
- Al-deek, H. M. et A. K. Kanafani (1989). Some Theoretical Aspects Of The Benefits Of En-route Vehicle Guidance. C. P. f. A. T. a. H. (PATH), University of California, Institute of Transportation Studies.
- Al-Deek, H. M., A. J. Khattak, *et al.* (1998). "A combined traveler behavior and system performance model with advanced traveler information systems." Transportation Research Part A: Policy and Practice **32**(7): 479-493.
- Allain, G. (2008). Prévision et analyse statistique du trafic routier par des méthodes statistiques, Université Toulouse III.
- Allsop, R. (1974). Some possibilities for using traffic control to influence trip distribution and route choice. Proceedings of the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory.

- Allsop, R. E. (1971). "SIGSET: a computer program for calculating traffic signal settings." Traffic Engineering Control **13**: 58-60.
- Allsop, R. E. (1976). "SIGCAP: A computer programme for assessing the traffic capacity of signal-controlled road junctions." Traffic Engineering Control **17**: 338-342.
- Amemiya, T. (1985). Advanced econometrics, Harvard Univ Pr.
- Andan, O. et B. Faivre d'Acier (2000). Les comportements de choix d'itinéraire route / autoroute pour les déplacements régionaux (50 à 200 k). Rapport du LET pour le Sétra.
- Antonisse, R. W., A. J. Daly, *et al.* (1989). "Highway Assignment Method Based on Behavioral Models of Car Drivers' Route Choice." Transportation Research Record.
- Aron, M. (2001). La régulation d'accès. Document de travail ATEC/ Télématique et sécurité routière. ATEC.
- Aron, M. (2001). La régulation de vitesse. Document de travail ATEC/ Télématique et sécurité routière. ATEC.
- Augagneur, J.-P., J.-P. Boulet, *et al.* (1992). Comportements des automobilistes en matière de choix d'itinéraires, ASFA.
- Avineri, E. et J. N. Prashker (2006). "The Impact of Travel Time Information on Travelers' Learning under Uncertainty." Transportation **33**(4): 393-408.
- Beilner, H. et F. Jacobs (1972). Probabilistic Aspects of traffic Assignment. Traffic Flow and Transportation. G. F. Newell, Elsevier.
- Ben-Akiva, M., M. J. Bergman, *et al.* (1984). Modelling Inter-Urban Route Choice Behavior. Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
- Ben-Akiva, M. et M. Bierlaire (1999). Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. Chapter for the Transportation Science Handbook, MIT.
- Ben-Akiva, M. et B. Boccara (1995). "Discrete choice models with latent choice sets." International Journal of Research in Marketing Consideration sets **12**(1): 9-24.

- Ben-Akiva, M., A. De Palma, *et al.* (1991). "Dynamic network models and driver information systems." Transportation Research Part A: General **25**(5): 251-266.
- Bezuidenhout, J. J. (2002). Investigating Drivers' Variance in Route Choice between the Home and Work Commute Trip in the AM and PM. Traffic management workshop 2002, Roturua.
- Bierlaire, M. et E. Frejinger (2005). Route Choice Models with Subpath Components. Swiss Transport Research Conference 5th.
- Bonsall, P. (1992). "The influence of route guidance advice on route choice in urban networks." Transportation **19**(1): 1-23.
- Bonsall, P. (2004). "Traveller behavior: Decision-making in an unpredictable world." Its Journal **8**(1): 45-60.
- Bovy, P. H. L. et M. A. Bradley (1985). "Route choice analysed with stated-preference approaches." Transportation Research Record(1037).
- Bovy, P. H. L. et E. Stern (1990). Route choice : wayfinding in transport networks. Dordrecht, Kluwer academic publishers.
- Box, G. E. P. et D. R. Cox (1964). "An analysis of transformations." J. R. Stat. Soc. B **26**: 211-252.
- Bréheret, L., F. Schettini, *et al.* (2000). Traitements de données de trafic : besoins, état de l'art, exemple de mise en oeuvre, CERTU.
- Burnett, G. E. (1998). "Turn right at the King's Head" Drivers' requirements for route guidance information, Loughborough University.
- Burrell, J. E. (1968). Multipath Route Assignment and Its Applications to Capacity Restraint. the 4th International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, West Germany.
- Cantarella, G. E., G. Improta, *et al.* (1991). "Iterative procedure for equilibrium network traffic signal setting." Transportation Research Part A: General **25**(5): 241-249.
- Cascetta, E. (1989). "A stochastic process approach to the analysis of temporal dynamics in transportation networks." Transportation Research Part B: Methodological **23**(1): 1-17.
- Cascetta, E., A. Nuzzolo, *et al.* (1996). A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems, specification and some

- calibration results for interurban networks. Proceedings of ISTTT conference, Lyon, Pergamon.
- Cascetta, E. et A. Papola (1998). Implicit Availability/Perception Logit Models for Route Choice in Transportation Networks. 8th World Conference on Transport Research.
- Certu (2008). Les temps de parcours: estimation, diffusion et approche multimodale.
- Cété-de-Lyon (1999). Effet de la signalisation sur l'affectation entre 2 itinéraires - Cas de la liaison entre A49 et A41Nord. rapport pour le Sétra.
- Cété-de-Lyon (1999). Effet de la signalisation sur l'affectation entre 2 itinéraires: Cas de la liaison entre A49 et A41Nord. R. d. C. d. L. p. I. Sétra.
- Chapulut, J.-N. (2004). Evaluation socio-économique des systèmes d'exploitation de la route en milieu urbain, Conseil général des ponts et chaussées.
- Chatterjee, K., N. B. Hounsell, *et al.* (2002). "Driver response to variable message sign information in London." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **10**(2): 149-169.
- Chen, O. et M. Ben-Akiva (1998). "Game-theoretic formulations of interaction between dynamic traffic control and dynamic traffic assignment." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1617**(-1): 179-188.
- Chen, R. B. et H. S. Mahmassani (2004). Travel time preception and learning mechanisms in traffic networks. 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.
- Chorus, C. G., E. J. E. Molin, *et al.* (2006). "Use and effects of Advanced Traveller Information Services (ATIS): A review of the literature." Transport Reviews **26**(2): 127-149.
- Cipriani, E. et G. Fusco (2004). "Combined signal setting design and traffic assignment problem." European Journal of Operational Research Traffic and Transportation Systems Analysis **155**(3): 569-583.
- Cipriani, E. et S. Gori (2000). Signal Control and Assignment Joint Models, Beijing, China, ASCE.
- Clark, C. E. (1961). "The Greatest of a Finite Set of Random Variables." Operations Research **9**(2): 145-162 CR - Copyright 1961 INFORMS.

- Clegg, R., M. Ghali, *et al.* (1995). A new dynamic micro-simulation/assignment model and new estimates of traffic control system performance including bus priority effects. 23rd European Transportation Forum, Seminar E.
- Clegg, R. G., A. Clune, *et al.* (2000). Traffic signal settings for diverse policy goals. ETC.
- Cleghorn, D., F. Hall, *et al.* (1991). "Improved Data Screening Techniques for Freeway Traffic Management Systems." Transportation Research Record **1320**: 17-31.
- Cohen, S. (1990). Ingénierie du trafic routier - Eléments de théorie du trafic et applications. Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Cohen, S. (1994). "Nouveaux outils pour la surveillance du trafic autoroutier." Revue Générale des Routes et Aérodromes **715**.
- Correa, J., A. Schulz, *et al.* (2005). "On the inefficiency of equilibria in congestion games." Integer Programming and Combinatorial Optimization: 167-181.
- Correa, J. R., A. S. Schulz, *et al.* (2003). Selfish Routing in Capacitated Networks, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Sloan School of Management.
- Daganzo, C. et Y. Sheffi (1977). "On Stochastic Models of Traffic Assignment." Transportation Science **11**: 253-274.
- Daly, A., S. Hess, *et al.* (2005). Modelling departure time and mode choice, European Regional Science Association.
- Danech-Pajouh, M. (2000). "Le temps de parcours et ses deux variantes de calcul." TRANSPORT ENVIRONNEMENT CIRCULATION: 16-22.
- Danech-Pajouh, M. (2003). "Les modèles de prévision du dispositif Bison futé et leur évolution." Recherche - Transports - Sécurité **78**: 1-20.
- Danech-Pajouh, M. et G. Scemama (2009). Temps de parcours de référence, un nouvel enjeu fort en terme de mobilité durable. ATEC-ITS, Versailles.
- de Palma, A., M. Kilani, *et al.* (2005). "Comparison of Second-Best and Third-Best Tolling Schemes on a Road Network." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1932**(-1): 89-96.
- De Palma, A. et R. Lindsey (1998). "Information and Usage of Congestible Facilities under Different Pricing Regimes." The Canadian Journal of

- Economics / Revue canadienne d'Economie **31**(3): 666-692 CR - Copyright 1998 Canadian Economics Association.
- de Palma, A. et R. Lindsey (2000). "Private toll roads: Competition under various ownership regimes." The Annals of Regional Science **34**(1): 13-35.
- de Palma, A., R. Lindsey, *et al.* (2008). "Private Operators and Time-of-Day Tolling on a Congested Road Network." Journal of Transport Economics and Policy **42**: 397-433.
- de Palma, A. et N. Picard (2005). "Route choice decision under travel time uncertainty." Transportation Research Part A: Policy and Practice **39**(4): 295-324.
- Denant-Boèmont, L. (2003). L'économie expérimentale : methodes, resultats et perspectives. Séminaire de l'IREIMAR – Méthodes d'observation et d'expérimentation en SHS, Rennes.
- Denant-Boèmont, L. et R. Petiot (2003). "Information value and sequential decision-making in a transport setting: an experimental study." Transportation Research Part B: Methodological **37**(4): 365-386.
- Denant-Boèmont, L., M. Willinger, *et al.* (2002). Les modèles structurels de congestion : une étude expérimentale. Predit.
- Desnouailles, C., P. Boillon, *et al.* (2007). L'affectation variable des voies: deux projets français pour minimiser la congestion des autoroutes urbaines. Rapport d'évaluation. Sétra.
- Desnouailles, C. et J. Nouvier (2009). Les panneaux à messages variables : harmonisation européenne et introduction dans la Convention de Vienne. Congrès ATEC-ITS.
- Dial, R. B. (1971). "A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration." Transportation Research **5**(2): 83-111.
- Dijkstra, E. W. (1959). "Note on Two Problems in Connection with Graphs." Numerical Mathematics **1**.
- Duhamel, M. (1994). Un demi-siècle de signalisation routière, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Duhamel, M. et J. Nouvier (2000). Signalisation routiere en France de 1946 a nos jours, Amc Editions.

- Emmerink, R. H. M., K. W. Axhausen, *et al.* (1995). "The potential of information provision in a simulated road transport network with non-recurrent congestion." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **3**(5): 293-309.
- Emmerink, R. H. M., P. Nijkamp, *et al.* (1996). "Variable message signs and radio traffic information: An integrated empirical analysis of drivers' route choice behaviour." Transportation Research Part A: Policy and Practice **30**(2): 135-153.
- Engelson, L. (2000). On co-ordination of the traffic information from multiple sources. KFB.
- Enrique Fernández L., J., J. de Cea Ch, *et al.* (2009). "Effect of advanced traveler information systems and road pricing in a network with non-recurrent congestion." Transportation Research Part A: Policy and Practice **43**(5): 481-499.
- Ettema, D., H. Timmermans, *et al.* (2003). Modelling perception updating of travel times in the context of departure time choice under ITS. ECWorkshop "Behavioural Responses to ITS", Eindhoven.
- Fisk, C. (1980). "Some developments in equilibrium traffic assignment." Transportation Research Part B: Methodological **14**(3): 243-255.
- Florian, M. et B. Fox (1976). "On the probabilistic origin of dial's multipath traffic assignment model." Transportation Research **10**(5): 339-341.
- Fonlupt, J. (1977). L'Affectation Exponentielle et le Problème du Plus Court Chemin dans un Graphe.
- Ford, L. R. et D. R. Fulkerson (1962). Flows in Networks, Princeton University Press.
- Fosgerau, M. et D. Fukuda (2008). Valuing reliability: Characteristics of travel time distribution on an urban road. ETC.
- Frejinger, E. et M. Bierlaire (2007). "Capturing correlation with subnetworks in route choice models." Transportation Research Part B: Methodological **41**(3): 363-378.
- Friesz, T. L., J. Luque, *et al.* (1989). "Dynamic Network Traffic Assignment Considered as a Continuous Time Optimal Control Problem." Operations Research **37**(6): 893-901.

- Gartner, N. (1975). "Area traffic control and network equilibrium." Operations Research Center Working Paper; OR 041-75.
- Gartner, N. et C. Stamatiadis (1998). "Integration of Dynamic Traffic Assignment with Real-Time Traffic Adaptive Control System." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1644**(-1): 150-156.
- Gaundry, M. J. I. et M. G. Dagenais (1979). "The dogit model." Transportation Research Part B: Methodological **13**(2): 105-111.
- Ghaii, M. et M. J. Smith. (1993). Traffic Assignment, Traffic Control and Road Pricing. Berkeley, Twelfth International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
- Haj Salem, H. (2006). Contrôle d'accès autoroutier. INRETS.
- Hawas, Y. E. Y. E. (2004). "A non-cooperative neuro-fuzzy system for integrating ATIS and ATMS decisions." Fuzzy Sets and Systems **144**(2): 313-343.
- Horowitz, J. L. (1984). "The stability of stochastic equilibrium in a two-link transportation network." Transportation Research Part B: Methodological **18**(1): 13-28.
- Hu, S.-R., C.-Y. Wang, *et al.* (2005). "Value of traffic information for route diversion control scheme under traffic incidents." Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies **6**: 2487 - 2501.
- Hu, T.-Y. et H. S. Mahmassani (1997). "Day-to-day evolution of network flows under real-time information and reactive signal control." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **5**(1): 51-69.
- Iida, Y., T. Akiyama, *et al.* (1992). "Experimental analysis of dynamic route choice behavior." Transportation Research Part B: Methodological **26**(1): 17-32.
- Jahn, O., R. Möhring, *et al.* (2004). System-Optimal Routing of Traffic Flows with User Constraints in Networks with Congestion, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Sloan School of Management.
- Jayakrisnan, R., H. S. Mahmassani, *et al.* (1994). "An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks." Transportation Research Record **2**(3).
- Jha, M., S. Madanat, *et al.* (1998). "Perception updating and day-to-day travel choice dynamics in traffic networks with information provision." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **6**(3): 189-212.



- Jotisankasa, A. et J. W. Polak (2005). A Framework for Travel Time Learning and Behavioural Adaptation in Route and Departure Time Choice. 85th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C, Transportation Research Record.
- Jou, R.-C., S.-H. Lam, *et al.* (2005). "Route switching behavior on freeways with the provision of different types of real-time traffic information." Transportation Research Part A: Policy and Practice **39**(5): 445-461.
- Karoonsoontawong, A. (2007). "Robustness approach to the integrated network design problem, signal optimization and dynamic traffic assignment problem."
- Khattak, A. J., Y. Yim, *et al.* (2003). "Willingness to pay for travel information." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **11**(2): 137-159.
- Khattak, A. J., Y. Yim, *et al.* (1999). "Does travel information equally influence commuter and non-commuter behavior? Results from the San-Francisco Bay Area TravInfo project." Transportation Research Record, TRB, National Academies, Washington, D.C.(1694): 48-58.
- Kroes, E. et R. Sheldon (1988). "Stated preference methods: an introduction." Journal of Transport Economics and Policy: 11-25.
- Lee, C. et R. Machemehl (1999). "Local and Iterative Searches for Combined Signal Control and Assignment Problem: Implementation and Numerical Examples." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1683**(-1): 102-109.
- Lefevre, E. et N.-E. E. Faouzi (2000). "Estimation et fusion des Temps de parcours routiers par la théorie de l'évidence." Recherche - Transports - Sécurité Volume 68.
- Lemoine, C. (2009). Urban pricing in Paris: lessons to be learned from abroad. European Transportation Conference 2009, The Netherlands, AET.
- Leurent, F. (1996). Contributions à l'affectation bicritère. séminaire GRT.
- Leurent, F. (2001). L'information dynamique sur le temps de parcours: position statistique, effet sur le choix d'horaire, mécanisme d'apprentissage. Modélisation du trafic, Actes du groupe de travail 2001, INRETS. **90**: 129-148.
- Leurent, F. (2001). Modèles désagrégés du trafic. Les collection de l'INRETS, outils et méthodes n°10.

- Leurent, F. (2002). "Modèles désagrégés du trafic (Outils et Méthodes INRETS n 10, novembre 2001)."
- Leurent, F. (2004). L'information dynamique sur le temps de parcours: position statistique, effet sur le choix d'horaire, mécanisme d'apprentissage. Modélisation du trafic, Actes du groupe de travail 2001, INRETS. Aron M, F. Boillot and J. Lebacque. Cachan, France, Lavoisier. **90**: 129-148.
- Leurent, F. (2004). L'information Dynamique sur les Temps de Parcours : Position Statistique, Effet sur le Choix d'Horaire, Mécanisme d'Apprentissage. Modélisation du trafic, actes du groupe de travail 2001. M. Aron, F. Boillot and J. P. Lebacque. France, INRETS. **90**: 129-148.
- Leurent, F. (2006). Prédiction spatialisée et temporalisée du trafic routier, pour la planification et pour l'exploitation en temps réel. S. Choi. Champs sur Marne, France, LVMT / ENPC.
- Leurent, F. et T. P. Nguyen (2008). Profit Individuel et Utilite Collective d'un Equipement D'information Dynamique : Modelisation Probabiliste et Analyse Economique. Congrès international ATEC-ITS 2008, Versailles.
- Leurent, F. et T. P. Nguyen (2010). Dynamic Information and Its Value to Individual User and to Traffic: Probabilistic Model with Economic Analysis. TRB 89th Annual Meeting, Washington, TRB.
- Leurent, F. et N. Wagner (2009). "User Equilibrium in a Bottleneck under Multipeak Distribution of Preferred Arrival Time." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2091**(-1): 31-39.
- Levinson, D. (2002). "The Economics of Traveler Information from Probes." Public Works Management Policy **6**(4): 241-249.
- Levinson, D. (2003). "The value of advanced traveler information systems for route choice." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **11**(1): 75-87.
- Levinson, D., D. Gillen, *et al.* (1999). Assessing the Benefits and Costs of Intelligent Transportation Systems: The Value of Advanced Traveler Information Systems. California PATH Research Report.
- Lindsey, C. et E. Verhoef (2000). "Traffic Congestion and Congestion Pricing."
- Lo, H. K. et W. Y. Szeto (2004). "Modeling advanced traveler information services: static versus dynamic paradigms." Transportation Research Part B: Methodological **38**(6): 495-515.

- Lotan, T. (1997). "Effects of familiarity on route choice behavior in the presence of information." Transportation Research Part C: Emerging Technology **5**(3-4): 225-243.
- Luoma, J., P. Rama, *et al.* (2000). "Effects of variable message signs for slippery road conditions on reported driver behaviour." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **3**(2): 75-84.
- Maher, M. (1992). SAM—A stochastic assignment model. Mathematics in Transport Planning and Control.
- Maher, M., K. Stewart, *et al.* (2005). "Stochastic social optimum traffic assignment." Transportation Research Part B: Methodological **39**(8): 753-767.
- Maher, M. J. et P. C. Hughes (1995). Estimation of the Potential Benefits from an ATT System Using a Multiple User Class Stochastic User Equilibrium Assignment Model. Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering.
- Malchow, M., A. Kanafani, *et al.* (1996). The Economics Of Traffic Information: A State-of-the-art Report. Working Papers. C. P. f. A. T. a. H. (PATH).
- Malchow, M., A. Kanafani, *et al.* (1997). Modeling the Behavior of Traffic Information Providers. Working Papers. C. P. f. A. T. a. H. (PATH).
- Mannering, F. L. (1989). "Poisson analysis of commuter flexibility in changing routes and departure times." Transportation Research Part B: Methodological **23**(1): 53-60.
- Michelin (2008). Atlas routier France et services utiles.
- Middelham, F. (2008). Traffic management: some history and future of ITS. 16th International Symposium on Electronics in Transport.
- Miles, J. et K. Chen, Eds. (2004). PIARC ITS Handbook. London, Route2 Market.
- Miller, A. J. (1963). A computer control system for traffic network. 2nd International Symposium on Theory of Road Traffic Flow, London.
- Mingyu, Z. (1995). Apports des systèmes d'information à l'exploitation des réseaux de voies rapides - le cas du réseau d'Ile-de-France. Inrets. Paris, Ecole nationale des ponts et chaussées: 337.
- Morikawa, T., T. Miwa, *et al.* (2005). Driver's Route Choice Behavior and its Implications on Network Simulation and Traffic Assignment.

- Moskowitz, K. (1956). "California Methode of Analysing Diverted Traffic To Proposed Freeway." Highway Research Board **130**.
- Nguyen, T. P. (2007). Information routière : l'évaluation des politiques et des moyens associés - Compte-rendu de journée technique ATEC-ITS France du 23/10/2007.
- Noland, R. B., K. A. Small, *et al.* (1998). "Simulating travel reliability." Regional Science and Urban Economics **28**(5): 535-564.
- OCDE (1998). La congestion routière en Europe. Conférence européenne des ministres de transport.
- OCDE (2002). La demande de trafic routier: relever le défi, Organisation de Coopération et de Développement Economiques.
- OCDE (2007). Managing Urban Traffic Congestion. Conférence européenne des ministres de transport.
- Office québécois de la langue française (2009). Grand dictionnaire terminologique.
- Papageorgiou, M., C. Diakaki, *et al.* (2003). Review of road traffic control strategies., IEEE L2 - <http://dro.dur.ac.uk/305/>.
- Papageorgiou, M., H. Hadj-Salem, *et al.* (1997). "ALINEA Local Ramp Metering: Summary of Field Results." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1603**(-1): 90-98.
- Payne, H. J., E. D. Helfenbein, *et al.* (1976). Development and testing of incident detection algorithms. Offices of Research and Development, Federal Highway Administration.
- Payne, J. W., J. R. Bettman, *et al.* (1993). The Adaptive Decision Maker, Cambridge University Press.
- Paz, A. et S. Peeta (2009). "Behavior-consistent real-time traffic routing under information provision." Transportation Research Part C: Emerging Technologies.
- Peeta, S. et H. Mahmassani (1995). "System optimal and user equilibrium time-dependent traffic assignment in congested networks." Annals of Operations Research **60**(1): 81-113.
- PIARC (2003). Manuel d'exploitation des réseaux routiers.

PIARC (2009). PIARC Terminologie.

Porche, I. et S. Lafortune (1998). On combined dynamic traffic assignment and traffic-responsive signal control, Citeseer.

Prashker, J. N. et S. Bekhor (2000). "Some observations on stochastic user equilibrium and system optimum of traffic assignment." Transportation Research Part B: Methodological **34**(4): 277-291.

Ramming, M. S. (2002). Network Knowledge and Route Choice. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Reddy, P. D. V. G., H. Yang, *et al.* (1995). "Design of an artificial simulator for analyzing route choice behavior in the presence of information system." Mathematical and Computer Modelling **22**(4-7): 119-147.

Saito, T., K. Yasui, *et al.* (1998). Effects of Traffic Information in a Network on the Dispersion of Traffic Flow.

Sakarovitch, M. (1968). "The k shortest chains in a graph." Transportation Research **2**(1): 1-11.

Schulz, A. et N. Moses (2003). On the performance of user equilibria in traffic networks. Proceedings of the fourteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, Society for Industrial and Applied Mathematics.

Schulz, A. et N. Stier-Moses (2006). "Efficiency and fairness of system-optimal routing with user constraints." NETWORKS-NEW YORK **48**(4): 223.

Selten, R., T. Chmura, *et al.* (2004). "Commuters route choice behaviour." Games and Economic Behavior **In Press, Corrected Proof**.

Sétra (1996). 503 glossaire de l'exploitation de la route.

Sétra (2000). Schéma directeur du système d'information routier.

Sheffi, Y. (1985). Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliff,.

Sheffi, Y. et W. B. Powell (1982). "An Algorithm for the Equilibrium Assignment Problem with Random Link times." Networks **12**(1): 191-207.

- Singh, R. (1999). Improved Speed-Flow Relationships: Application to Transportation Planning Models. 7th TRB Conference on Application of Transportation Planning Methods.
- Smith, M. (1979). "The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria." Transportation Research Part B: Methodological **13**(4): 295-304.
- Smith, M. (1979). "Traffic control and route-choice; a simple example." Transportation Research Part B: Methodological **13**(4): 289-294.
- Smith, M. (1980). "A local traffic control policy which automatically maximises the overall travel capacity of an urban road network." Traffic Engineering and Control **21**: 298-302.
- Smith, M. et M. Ghali (1990). "The dynamics of traffic assignment and traffic control: A theoretical study." Transportation Research Part B: Methodological **24**(6): 409-422.
- Smith, M. et T. Van Vuren (1993). "Traffic equilibrium with responsive traffic control." Transportation Science **27**(2): 118-132.
- Smith, M. J. (1979). "Traffic control and route-choice; a simple example." Transportation Research Part B: Methodological **13**(4): 289-294.
- Smith, M. J. (2006). Bilevel Optimisation of Prices and Signals in Transportation Models. Mathematical and Computational Models for Congestion Charging: 159-199.
- Stier-Moses, N. E. (2004). Selfish versus coordinated routing in network games, Massachusetts Institute of Technology.
- Stif (2009). "Organisation institutionnelle et exploitation du réseau routier francilien."
- Taale, H. et H. Van Zuylen (2002). Anticipatory Control: Effects of Uncertainty in Travel Times. Proceedings of the 13th Mini-EURO Conference "Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems, Citeseer.
- Taale, H. et H. van Zuylen (2003). "Effects of anticipatory control with multiple user classes." EJTIR **3**(1): 61-76.
- Tagliacozzo, F. et F. Pirzio (1973). "Assignment models and urban path selection criteria: Results of a survey of the behaviour of road users." Transportation Research **7**(3): 313-329.

- Tagliacozzo, R. et M. Kochen (1970). "Information-seeking behavior of catalog users." Information Storage and Retrieval **6**(5): 363-381.
- Tobin, J. (1958). "Liquidity Preference as Behavior Towards Risk." The review of economic studies **25**(2): 65-86.
- Tversky, A. (1972). "Choice by elimination." Journal of Mathematical Psychology **9**(4): 341-367.
- Ubbels, B. (2009). Review of evidence on the effects of road pricing. European Transportation Conference 2009, The Netherlands, AET.
- Van Vuren, T. et D. Watling (1991). "Multiple User Class Assignment Model for Route Guidance." Transportation Research Record **1306**(In-Vehicle Information Systems - Modeling Traffic Networks and Behavioral Considerations): pp. 22-32.
- Vany, A. D. et T. R. Saving (1980). "Competition and Highway Pricing for Stochastic Traffic." The Journal of Business **53**(1): 45-60.
- Verhoef, E., P. Nijkamp, *et al.* (1996). "Second-Best Congestion Pricing: The Case of an Untolled Alternative." Journal of Urban Economics **40**(3): 279-302.
- Verhoef, E. T. (2002). "Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points." Transportation Research Part B: Methodological **36**(8): 707-729.
- Verhoef, E. T. (2002). "Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands." Regional Science and Urban Economics **32**(3): 281-310.
- Verhoef, E. T., R. H. M. Emmerink, *et al.* (1996). "Information provision, flat and fine congestion tolling and the efficiency of road usage." Regional Science and Urban Economics **26**(5): 505-529.
- Vickrey, W. S. (1967). "Optimization of Traffic and Facilities." Journal of Transport Economics and Policy: pp. 123-136.
- Vincent, R. A. et C. P. Young (1986). "Self-optimizing traffic signal control using microprocessor: The TRRL "MOVA" strategy for isolated intersections." Traffic Engineering Control **27**: 385-387.
- Wachs, M. (1967). "Relationships Between Drivers' Attitudes Toward Alternate Routes and Driver and Route Characteristics." Highway Research Record(197): 70-87.

- Wardman, M., P. W. Bonsall, *et al.* (1997). "Driver response to variable message signs: A stated preference investigation." Transportation Research Part C- Emerging Technologies **5**(6): 389-405.
- Wardrop, J. G. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Road Paper.
- Watling, D. (1990). "A Comparison of System Optimal and User Optimal Route Guidance."
- Webster, F. V. (1958). Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper. London, Great Britain Road Research Laboratory.
- Wie, B.-W., R. L. Tobin, *et al.* (1995). "A comparison of system optimum and user equilibrium dynamic traffic assignments with schedule delays." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **3**(6): 389-411.
- Wolshon, B. et L. Lambert (2006). "Reversible Lane Systems: Synthesis of Practice." Journal of Transportation Engineering **132**(12): 933-944.
- Wu, J. J., H. J. Sun, *et al.* (2009). "Reversible lane-based traffic network optimization with an advanced traveller information system." Engineering Optimization **41**(1): 87 - 97.
- Yang, H. (1999). "Evaluating the benefits of a combined route guidance and road pricing system in a traffic network with recurrent congestion." Transportation **26**(3): 299-322.
- Yang, H. et M. G. H. Bell (1998). "Models and algorithms for road network design: a review and some new developments." Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal **18**(3): 257 - 278.
- Yang, H. et H. Huang (2004). "The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem." Transportation Research Part B: Methodological **38**(1): 1-15.
- Yang, H. et S. Yagar (1994). "Traffic assignment and traffic control in general freeway-arterial corridor systems." Transportation Research Part B: Methodological **28**(6): 463-486.
- Yang, H. et S. Yagar (1995). "Traffic assignment and signal control in saturated road networks." Transportation Research Part A: Policy and Practice **29**(2): 125-139.



- Yim, Y., A. J. Khattak, *et al.* (2004). Traveler Response to New Dynamic Information Sources: Analyzing Corridor and Area-Wide Behavioral Surveys. working paper. C. P. f. A. T. a. H. (PATH).
- Zhang, H. et Z. Gao (2007). "Two-way road network design problem with variable lanes." Journal of Systems Science and Systems Engineering **16**(1): 50-61.
- Zhang, R. et E. T. Verhoef (2006). "A monopolistic market for advanced traveller information systems and road use efficiency." Transportation Research Part A: Policy and Practice **40**(5): 424-443.



## Notation

---

Terme	Définition
$Q$	Volume totale de la demande : nombre d'utilisateurs qui souhaitent se déplacer de l'origine à la destination
$q'$	Volume de la classe informée : nombre d'utilisateurs qui sont équipés en information dynamique du trafic
$q^N$	Volume de la classe non-informée : nombre d'utilisateurs qui ne sont pas équipés en information dynamique du trafic : $q^N = Q - q'$
$\beta$	Taux d'équipement : le pourcentage des personnes équipées en information dynamique du trafic parmi l'ensemble des utilisateurs : $\beta = q' / Q$
O	Origine
D	Destination
UE	(User Equilibrium) Equilibre de l'Utilisateur : un motif de comportement où chaque utilisateur prend de décision égoïste afin de minimiser son coût individuel sans tenir en compte les effets sur l'autrui
SO	(System Optimum) Optimum du Système : le motif de comportement où l'ensemble des utilisateurs prennent de décision coopérative afin de minimiser le coût global du système.
IC	(Informed cooperative) : un motif de comportement où les utilisateurs informés cherchent de manière coopérative entre eux afin de minimiser le coût de la classe informée ; les utilisateurs non-informés restent égoïstes.
NT	(No Tolling) Sans tarification : aucune mesure de tarification n'est appliquée sur le réseau.
FT	(Flat Tolling) Tarification fixe : tarif de péage fixe est appliqué pour toutes les occurrences.
DT	(Dynamic Tolling) Tarification dynamique : le tarif de péage est calculé/optimisé en fonction des perturbations et de la demande.
SC	(Static Control) Allocation fixe de capacité : l'allocation de capacité est fixée pour toutes les occurrences.
DC	(Dynamic Control) Allocation de capacité est variable en fonction des perturbations et de la demande.



## Liste des publications associées

---

Leurent, F. and T. P. Nguyen (2008). Profit Individuel et Utilité Collective d'un Equipement D'information Dynamique : Modélisation Probabiliste et Analyse Economique. Congrès international ATEC-ITS 2008, Versailles.

Leurent, F. and T. P. Nguyen (2008). The value of a Dynamic Information Device to the Individual User and to the Traffic: a Probabilistic Model with Economic Analysis. European Transport Conference 2008, the Netherlands, AET.

Leurent, F. and T. P. Nguyen (2010). Dynamic Information and Its Value to the Individual User and to the Traffic: a Probabilistic Model with Economic Analysis. Transportation Research Board Annual Meeting 2010 TRB # 10-1088

Leurent, F. and T. P. Nguyen (2009). On Dynamic Traffic Information and Patterns of Cooperative Behaviours: a Probabilistic Model with Economic Analysis. European Transport Conference 2009, The Netherlands, AET.

Leurent, F. and T. P. Nguyen (2009). On Dynamic Traffic Information and Patterns of Cooperative Behaviours: a Probabilistic Model with Economic Analysis. Roma ITS International Conference 2009, Rome, Arcane.

Leurent, F. and T. P. Nguyen (2009). On Dynamic Traffic Information and Patterns of Cooperative Behaviours: a Probabilistic Model with Economic Analysis. ATEC-ITS France 2010, Versailles, France.

Leurent, F. and T. P. Nguyen (2010). Network Optimization with Dynamic Traffic Information and Tolling: a Probabilistic Model and Economic Analysis. Paper prepared for the WCTR '2010, Lisbon.

Leurent, F. and T. P. Nguyen (2010). Network Optimization with Dynamic Traffic Information and Capacity Management. Draft paper.



## Annexes

---

Nous présentons ici les formules utilisées au cours de notre traitement analytique, notamment dans les chapitres 6 et 7.

### ANNEXE 1. PROPRIÉTÉ DES DISTRIBUTIONS PROBABILISTES

#### Variable aléatoire gaussienne

Soient des variables aléatoires gaussiennes  $\zeta_a \approx N(\mu_a, \sigma_a^2)$ . Si  $\zeta_1$  et  $\zeta_2$  sont indépendantes, alors  $\Delta\zeta = \zeta_2 - \zeta_1$  est gaussienne de moyenne  $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$  et de variance  $\sigma_\Delta^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ .

Pour une variable gaussienne  $Z \approx N(\mu, \sigma^2)$ , la fonction de répartition cumulée est

$$F(z) = \Pr\{Z \leq z\} = \Phi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right) \quad (9.1)$$

avec  $\Phi$  la fonction de répartition d'une variable de moyenne nulle et de variance unité, primitive de la fonction de densité  $t \mapsto \phi(t) = \exp(-t^2/2)/\sqrt{2\pi}$  qui est la fonction « en cloche » bien connue.

La fonction de moment tronqué,  $\tilde{F}(z) = \int^z u dF(u)$ , vérifie que

$$\begin{aligned} \tilde{F}(b) - \tilde{F}(a) &= \int_a^b z dF(z) = \int_a^b \frac{z - \mu}{\sigma} \phi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right) dz \\ &= \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b \left(\frac{z - \mu}{\sigma} + \frac{\mu}{\sigma}\right) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)^2\right] d\frac{z - \mu}{\sigma} \\ \tilde{F}(b) - \tilde{F}(a) &= \sigma \left[-\phi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]_a^b + \mu \int_{(a - \mu)/\sigma}^{(b - \mu)/\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}t^2\right] dt \\ &= [\mu \cdot \Phi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right) - \sigma \cdot \phi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)]_a^b \end{aligned}$$

Donc

$$\tilde{F}(z) = \mu \cdot \Phi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right) - \sigma \cdot \phi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right) \quad (9.2)$$

### Variable aléatoire Bernoulli-exponentielle

Adoptons une distribution non-négative  $\zeta_a$  qui a la probabilité d'être positif  $\eta_a$ , et la probabilité d'être nulle  $1-\eta_a$ . Dans le cas d'être positif,  $\zeta_a$  suit une distribution Exponentielle. Donc  $\zeta_a$  suit une distribution mixte Bernoulli-Exponentielle:

$$\zeta_a = U_a \cdot V_a$$

Dans laquelle  $U_a \approx B(\eta_a)$ , une distribution Bernoulli de paramètre  $\eta_a$  et  $V_a \approx \text{Exp}(\lambda_a)$ , une distribution Exponentielle de paramètre  $\lambda_a$ .

Si  $U_a, V_a$  sont indépendantes,  $\zeta_a$  a  $E(\zeta_a) = \eta_a / \lambda_a$ ,  $\text{Var}(\zeta_a) = \eta_a(2 - \eta_a) / \lambda_a^2$  et CDF:

$$\begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 - \eta_a \exp(-\lambda_a x) & x \geq 0 \end{cases}$$

Difference of two Mixed Bernoulli-Exponential ( $\Delta BE$ )	
Formulation	$Z = U_2 V_2 - U_1 V_1; U_a = \text{Bernoulli}(\eta_a), V_a = \text{Exp}(\lambda_a)$
$E_{\eta_a, \lambda_a}^{\Delta BE}$	$(\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1})$
$\text{Var}_{\eta_a, \lambda_a}^{\Delta BE}$	$\frac{\eta_1(2 - \eta_1)}{\lambda_1^2} + \frac{\eta_2(2 - \eta_2)}{\lambda_2^2}$
Pdf/Pmf	#
Cdf $F_{\eta_a, \lambda_a}^{\Delta BE}(x)$	$\begin{cases} (\eta_1 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}) \exp(\lambda_1 x) & x < 0 \\ 1 - (\eta_2 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) \exp(-\lambda_2 x) & x \geq 0 \end{cases}$
Moment $\tilde{F}_{\eta_a, \lambda_a}^{\Delta BE}(x)$	$\begin{cases} (\eta_1 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2})(x - \frac{1}{\lambda_1}) \exp(\lambda_1 x) & x < 0 \\ (\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1}) - (\eta_2 - \frac{\eta_1 \eta_2 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2})(x + \frac{1}{\lambda_2}) \exp(-\lambda_2 x) & x \geq 0 \end{cases}$
$G_{\eta_a, \lambda_a}^{\Delta BE}(x)$	$\begin{cases} (\frac{\eta_1}{\lambda_1} - \frac{\eta_1 \eta_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) \exp(\lambda_1 x) & x < 0 \\ -(\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1}{\lambda_1}) + x + (\frac{\eta_2}{\lambda_2} - \frac{\eta_1 \eta_2}{\lambda_1 + \lambda_2}) \exp(-\lambda_2 x) & x \geq 0 \end{cases}$



## Minimum de deux variables aléatoires

Au § 5.4 nous avons eu à calculer  $\bar{C}' = E_{\omega}[\min\{c_1(\omega), c_2(\omega)\}]$ , pour deux variables aléatoires  $c_a(\omega)$  représentant des coûts.

Pour effectuer ce calcul, reformulons :

$$\min\{c_1(\omega), c_2(\omega)\} = c_1(\omega) + [c_2(\omega) - c_1(\omega)] \cdot 1_{\{c_2(\omega) - c_1(\omega) \leq 0\}}$$

Alors, par la linéarité de la moyenne,

$$\begin{aligned} E[\min\{c_1, c_2\}] &= E[c_1] + E[(c_2 - c_1) \cdot 1_{\{c_2 - c_1 \leq 0\}}] \\ &= \bar{c}_1 + \int_{-\infty}^{+\infty} z \cdot 1_{\{z \leq 0\}} dF(z) \text{ pour } Z = c_2 - c_1 \text{ et sa fonction de répartition } F \\ &= \bar{c}_1 + \int_{-\infty}^0 z dF(z) \end{aligned}$$

En utilisant la fonction de moment tronqué, il vient

$$E[\min\{c_1(\omega), c_2(\omega)\}] = \bar{c}_1 + \tilde{F}(0)$$

Dans le cas de variables gaussiennes indépendantes  $c_a \approx N(\bar{c}_a, \sigma_a^2)$ , on spécifie la formule du moment tronqué, pour les paramètres  $\mu = \bar{c}_2 - \bar{c}_1$  et  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$  :

$$\begin{aligned} E[\min\{c_1, c_2\}] &= \bar{c}_1 + (\bar{c}_2 - \bar{c}_1) \cdot \Phi\left(\frac{\bar{c}_1 - \bar{c}_2}{\sigma}\right) - \sigma \cdot \phi\left(\frac{\bar{c}_1 - \bar{c}_2}{\sigma}\right) \\ &= \bar{c}_1 \cdot \Phi\left(\frac{\bar{c}_2 - \bar{c}_1}{\sigma}\right) + \bar{c}_2 \cdot \Phi\left(\frac{\bar{c}_1 - \bar{c}_2}{\sigma}\right) - \sigma \cdot \phi\left(\frac{\bar{c}_1 - \bar{c}_2}{\sigma}\right) \end{aligned}$$

Quand les variables gaussiennes sont corrélées, les formules sont conservées à condition d'ajuster la variance de  $Z$ , qui devient  $\sigma^2 = v_{11} + v_{22} - 2v_{12}$  en fonction des variances et covariances des  $c_a$ .

## ANNEXE 2. FORMULES DU CHAPITRE 6

### Formules du débit d'arc moyen des usagers informés

Nous avons donné les formules qui contiennent des fonctions de répartition  $F$  et de moment tronqué  $\tilde{F}$ .

Dans le cas général, comme la fonction  $x \mapsto xF(x) - \tilde{F}(x)$  est la primitive de  $x \mapsto F(x)$ , si celle-ci est continue alors, par le théorème de la valeur intermédiaire, il existe  $z \in [A, B]$  tel que

$$x_2' = \frac{F(z) \cdot (B-A)}{\gamma_1 + \gamma_2} = q' F(z)$$

Si  $q' > 0$  et si  $F(B) > F(A)$  alors  $x_2' > 0$ , la classe  $I$  se répartit non trivialement entre les itinéraires.

Dans le cas gaussien, ces fonctions sont à spécifier selon les formules du § 9.1, avec comme paramètres  $\mu = \bar{t}_2 - \bar{t}_1$  et  $\sigma^2 = \beta(\bar{t}_1 + \bar{t}_2)$ .

### Cas des coûts moyens inégaux

Dans ce cas les bornes d'intégration sont connues et fixées, car si  $\bar{t}_1 < \bar{t}_2$  alors  $\bar{x}_1^N = q^N$  et  $\bar{x}_2^N = 0$  : donc

$$\begin{cases} A = \alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 q^N - \gamma_2 q' \\ B = \alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 q^N + \gamma_1 q' \end{cases}$$

Alors les formules (6.8) et (6.9) fournissent directement les débits  $\bar{x}_a^I$ . Dans le cas gaussien centré, comme  $x F(x) - \tilde{F}(x) = x \Phi(\frac{x}{\sigma}) + \phi(\frac{x}{\sigma})$ ,

$$\bar{x}_2^I = \frac{\sigma}{\gamma_1 + \gamma_2} [g(\frac{B}{\sigma}) - g(\frac{A}{\sigma})]$$

en notant  $g(x) = \phi(x) + x \Phi(x)$ .

Comme  $dg/dx = \Phi(x)$ , la fonction  $g$  est croissante, infinie en plus infinie car proche de l'identité pour les fortes valeurs positives, et nulle en moins infini car la fonction  $\Phi$  domine le terme en  $x$ .

### Cas d'égalité des coûts moyens

Dans le cas où les coûts moyens sont égaux, posons :

$$\bar{t}_a = \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^N + \gamma_a \bar{x}_a^I = \theta$$

Les seuils d'intégration valent respectivement :

$$B = \alpha_1 + \gamma_1 \bar{x}_1^N - \alpha_2 - \gamma_2 \bar{x}_2^N + \gamma_1 q' = \theta - \gamma_1 \bar{x}_1^I - \theta + \gamma_2 \bar{x}_2^I + \gamma_1 (\bar{x}_1^I + \bar{x}_2^I)$$

$$B = (\gamma_1 + \gamma_2) \bar{x}_2^I$$

$$A = B - (\gamma_1 + \gamma_2) q' = -(\gamma_1 + \gamma_2) \bar{x}_1^I$$

L'équation caractéristique en  $\bar{x}'_2$  se réécrit en fonction de B et de la « constante »  $D = (\gamma_1 + \gamma_2)q'$  :

$$B = B.F(B) - \tilde{F}(B) - (B-D).F(B-D) + \tilde{F}(B-D)$$

Supposons que  $B = D/2$  : alors le membre de droite devient

$$\begin{aligned} B.F(B) - \tilde{F}(B) + B.F(-B) + \tilde{F}(-B) &= B.[F(B) + F(-B)] \text{ car } \tilde{F}(B) = -\Phi(x/\sigma) = \tilde{F}(-B) \\ &= B \text{ car } F(x) = \Phi(x/\sigma) = 1 - F(-x) \end{aligned} \quad \text{Donc}$$

l'équation caractéristique admet pour solution

$$\bar{x}'_2 = \frac{q'}{2}$$

et par conséquent

$$\bar{x}'_1 = \frac{q'}{2}$$

A partir de l'égalité des temps moyens, en exploitant les équations précédentes pour  $\bar{x}_a = \bar{x}_a^N + \bar{x}'_a$ , nous obtenons encore

$$\bar{x}_a^N = \frac{Q\gamma_{3-a} + \alpha_{3-a} - \alpha_a}{\gamma_{3-a} + \gamma_a} - \frac{q'}{2}$$

### Condition d'inégalité des coûts moyens

Examinons maintenant les conditions d'égalité ou d'inégalité des coûts moyens, en fonction des paramètres du modèle.

Supposons que  $\alpha_1 \leq \alpha_2$  pour discriminer les deux arcs. Alors, pour un volume total faible  $Q < Q_0^* \equiv \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\gamma_1}$ , même si l'ensemble du volume se chargeait sur

l'arc 1 celui-ci aurait un temps moyen plus faible que l'arc 2 : les temps moyens ne peuvent être égaux.

Supposons à présent que  $Q \geq Q_0^* \equiv \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\gamma_1}$ , et recherchons des débits  $x_1^N, x_2^N$

assurant l'égalité des temps moyens, tels que  $x_1^N + x_2^N = q^N = Q(1-r)$  et  $x_2^N = \pi q^N$  en fonction d'un paramètre  $\pi$ . La condition d'égalité implique  $x'_1 = x'_2 = q'/2$ , donc elle se formule

$$\alpha_1 + \gamma_1(1-\pi)(1-\beta)Q + \gamma_1 \frac{\beta Q}{2} = \alpha_2 + \gamma_2\pi(1-\beta)Q + \gamma_2 \frac{\beta Q}{2}$$

$$\alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1(1-\beta)Q + (\gamma_1 - \gamma_2) \frac{\beta Q}{2} = (\gamma_1 + \gamma_2)\pi(1-\beta)Q$$

$$\begin{aligned} \pi &= \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 Q - \gamma_1 \beta Q + \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)\beta Q}{(\gamma_1 + \gamma_2)(1-\beta)Q} \\ &= \frac{1}{2} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)Q}{(\gamma_1 + \gamma_2)(1-\beta)Q} \equiv \hat{\pi} \end{aligned}$$

Cette suite d'égalités montre que la condition d'égalité des coûts moyens équivaut à la condition d'égalité  $\pi = \hat{\pi}$ . La condition d'égalité des coûts moyens et de faisabilité physique est l'égalité pour une variable  $\pi$  qui soit effectivement une proportion, donc qui soit comprise entre 0 et 1 : elle se traduit donc par une condition double  $0 \leq \hat{\pi} \leq 1$ , soit

$$\begin{cases} 0 \leq \frac{1}{2} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)Q}{(\gamma_1 + \gamma_2)(1-\beta)Q} \\ \frac{1}{2} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)Q}{(\gamma_1 + \gamma_2)(1-\beta)Q} \leq 1 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} [\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta]Q \geq \alpha_2 - \alpha_1 \\ \alpha_1 - \alpha_2 \leq [\gamma_2 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta]Q \end{cases}$$

Examinons la première condition,  $[\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta]Q \geq \alpha_2 - \alpha_1$ . Si  $[\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta] < 0$  i.e.  $\beta > \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$  elle est impossible. Si  $\beta \leq \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$  il faut et il suffit que

$$Q \geq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{[\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta]} \equiv Q_{\beta}^* \quad (9.14)$$

Quant à la seconde condition,  $\alpha_1 - \alpha_2 \leq [\gamma_2 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta]Q$  : si  $[\gamma_2 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta] > 0$  i.e.  $\beta < \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$  alors elle est satisfaite. Mais si  $\beta \geq \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$  alors il faut et il suffit que  $Q \leq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta - \gamma_2}$ .

Au total, selon la valeur de  $\beta$  :

si  $\beta < \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$  et  $\beta \leq \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$  il faut et il suffit que  $Q \geq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{[\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta]} \equiv Q_{\beta}^*$ . En dessous de ce seuil,  $q^N$  s'affecte seulement sur l'arc de temps libre minimal.

Si  $\beta \geq \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$  et  $\beta \leq \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$  il faut et il suffit que  $\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta} \leq Q \leq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta - \gamma_2}$ . En

dessous de la borne inférieure,  $q^N$  s'affecte seulement à l'arc de temps libre minimal, et au dessus de la borne supérieure  $q^N$  s'affecte exclusivement à l'autre arc.

Si  $\beta > \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$ , l'égalité n'est pas possible.

Si  $\gamma_2 \leq \gamma_1$  les trois cas de figure se présentent, tandis que si  $\gamma_2 > \gamma_1$  le cas intermédiaire ne peut survenir.

La condition caractéristique d'égalité peut s'exprimer aussi en fonction de  $\beta$  relativement à  $Q$ . Dans le premier cas de figure, la condition est alors :

$$\gamma_1 - \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)\beta \geq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{Q}, \text{ ou encore}$$

$$\beta \leq \frac{2}{\gamma_1 + \gamma_2} \left[ \gamma_1 - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{Q} \right] \equiv \beta_Q^*$$

Dans le second cas de figure, la borne supérieure du cas d'égalité est

$$\beta \leq \frac{2}{\gamma_1 + \gamma_2} \left[ \gamma_2 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{Q} \right] \equiv \beta_Q^\#$$

### Détermination concrète de l'état d'équilibre

Au total, nous avons caractérisé l'état d'équilibre comme la solution d'un problème de point fixe en fonction des variables  $\bar{x}_a^N$  : on doit vérifier qu'un jeu particulier  $\bar{x}_a^N$  avec les débits  $\bar{x}_a'$  qui en sont déduits conformément au §b, satisfont les conditions d'équilibre du §c.

Une méthode efficace pour résoudre ce problème de point fixe est de procéder par dichotomie sur l'intervalle de variation  $x_1^N \in [0, q^N]$  : en recherchant d'abord une solution extrême avec  $y_0 \equiv \bar{x}_1^{N[0]} = q^N$ ,  $\bar{x}_2^{N[0]} = 0$  (on s'arrête si elle convient), puis l'autre solution extrême avec  $z_0 \equiv \bar{x}_1^{N[1]} = 0$ ,  $\bar{x}_2^{N[1]} = q^N$  (on s'arrête si elle convient), et si besoin en continuant : à l'itération  $k$ , on dispose d'un minorant  $y_0$  et d'un majorant  $z_0$ , on teste  $\bar{x}_1^{N[k]} = (y_0 + z_0)/2$ , et selon que le résultat des §b-c en  $\bar{x}_1^N$  est plus faible que  $\bar{x}_1^{N[k]}$  ou plus fort, on actualise  $[y_0, z_0]$  en  $[y_0, \bar{x}_1^{N[k]}]$  ou  $[\bar{x}_1^{N[k]}, z_0]$ , respectivement.

Coût minimum moyen des usagers informés, modèle fin

Au § 6.3 nous avons considéré le coût minimum moyen des usagers informés, dans le modèle amélioré avec le traitement fin. Nous avons calculé cette moyenne en conditionnant par la variable aléatoire  $Z = \Delta\zeta = \zeta_2 - \zeta_1$ .

La formule fait intervenir des moyennes conditionnelles,  $\bar{\zeta}_{1/Z}$  qui est la moyenne de  $\zeta_1$  conditionnellement à la valeur  $z$  pour  $Z$ . Dans le cas gaussien, nous pouvons exprimer précisément de telles moyennes conditionnelles, et en déduire simplement le gain d'être informé.

### Le coût moyen dans le cas gaussien

En termes de densité de probabilité, par la formule de Bayes pour les probabilités conditionnelles,

$$f(\zeta_1 = x / Z = z) = \frac{\Pr(\{\zeta_1 = x\} \cap \{\zeta_2 = z - x\})}{\Pr\{\zeta_1 + \zeta_2 = z\}} \\ \propto f(\zeta_1 = x) \cdot f(\zeta_2 = z - x) \text{ dans le cas indépendant}$$

$$f(\zeta_1 / Z = z) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta_1 - \mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \zeta_1 - \mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right) \\ \propto \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\zeta_1}{\sigma_1}\right)^2 - 2\frac{\zeta_1}{\sigma_1}\frac{\mu_1}{\sigma_1} + \left(\frac{\mu_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{\zeta_1}{\sigma_2}\right)^2 - 2\frac{\zeta_1}{\sigma_2}\frac{\mu_2 - z}{\sigma_2} + \left(\frac{\mu_2 - z}{\sigma_2}\right)^2\right]\right) \\ \propto \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\zeta_1}{\sigma^*}\right)^2 - 2\frac{\zeta_1}{\sigma^*}\left[\frac{\sigma^*\mu_1}{\sigma_1^2} + \frac{\sigma^*(\mu_2 - z)}{\sigma_2^2}\right] + \left(\frac{\mu_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{\mu_2 - z}{\sigma_2}\right)^2\right]\right) \text{ avec } \frac{1}{\sigma^{*2}} = \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} \\ \propto \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\zeta_1}{\sigma^*}\right)^2 - 2\left[\frac{\sigma^*\mu_1}{\sigma_1^2} + \frac{\sigma^*(\mu_2 - z)}{\sigma_2^2}\right]\frac{\zeta_1}{\sigma^*} + \left(\frac{\mu_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{\mu_2 - z}{\sigma_2}\right)^2\right]\right) \\ \propto \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta_1}{\sigma^*} - \left[\frac{\sigma^*\mu_1}{\sigma_1^2} + \frac{\sigma^*(\mu_2 - z)}{\sigma_2^2}\right]\right)^2\right]$$

Cela nous montre que, conditionnellement à  $Z$  :

$$\zeta_{1/Z} \approx N\left(\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\mu_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}(\mu_2 - Z), \sigma^{*2}\right)$$

Cette distribution nous révèle la moyenne de  $\zeta_1$  conditionnellement à la valeur de  $Z$  :

$$\bar{\zeta}_{1/Z} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\mu_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}(\mu_2 - Z)$$

Comme  $\sigma^{*2} = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  donc  $\frac{\sigma^{*2}}{\sigma_1^2} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ , nous en déduisons que

$$\int_a^b \bar{\zeta}_{1/Z} dF(z) = \int_a^b \left[\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\mu_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}(\mu_2 - z)\right] dF(z) \\ = \frac{\sigma_2^2\mu_1 + \sigma_1^2\mu_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot [F(b) - F(a)] - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} [\tilde{F}(b) - \tilde{F}(a)]$$

La variable aléatoire  $\zeta_2$  conditionnelle à  $Z$  est obtenue comme la somme  $\zeta_2 = Z + \zeta_1$ , et sa moyenne vaut  $\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \mu_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} (\mu_2 - Z) + Z = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} (\mu_1 + Z) + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \mu_2$ . Donc

$$\begin{aligned} \int_a^b \bar{\zeta}_{2/z} dF(z) &= \int_a^b \left[ \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} (\mu_1 + z) + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \mu_2 \right] dF(z) \\ &= \frac{\sigma_2^2 \mu_1 + \sigma_1^2 \mu_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot [F(b) - F(a)] + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} [\tilde{F}(b) - \tilde{F}(a)] \end{aligned}$$

Dans la formule de  $\bar{C}^I$ , le terme

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF(z) + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF(z) &= \frac{\sigma_2^2 \mu_1 + \sigma_1^2 \mu_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + \tilde{F}(A) - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \tilde{F}(\infty) \\ &= \tilde{F}(A) \end{aligned}$$

Sous la condition que les moyennes soient nulles.

On réduit donc

$$\bar{C}^I = \alpha_1' + \gamma_1 q' + \frac{\gamma_1 [\tilde{F}(B) - B \cdot F(B)] + \gamma_2 [\tilde{F}(A) - A \cdot F(A)]}{\gamma_1 + \gamma_2}$$

Par comparaison à la formule pour  $\bar{x}_1'$ , nous re-formulons

$$\begin{aligned} \bar{C}^I &= \alpha_1' + \gamma_1 q' + \frac{\gamma_1 [\tilde{F}(B) - B \cdot F(B) - \tilde{F}(A) + A \cdot F(A)]}{\gamma_1 + \gamma_2} + \tilde{F}(A) - A \cdot F(A) \\ &= \alpha_1' + \gamma_1 \bar{x}_1' + \tilde{F}(A) - A \cdot F(A) \\ &= \bar{t}_1 + \tilde{F}(A) - A \cdot F(A) \end{aligned}$$

Comme dans le cas gaussien centré  $\tilde{F}(x) - x \cdot F(x) = -\sigma \phi(\frac{x}{\sigma}) - x \Phi(\frac{x}{\sigma}) = -\sigma g(\frac{x}{\sigma})$  avec la fonction  $g(x) = \phi(x) + x \Phi(x)$  déjà utilisée au § 9.3.a, nous pouvons exprimer :

$$\bar{C}^I = \bar{t}_1 - \sigma \cdot g\left(\frac{A}{\sigma}\right)$$

### Formulation du gain d'information

Quand les temps moyens des itinéraires sont égaux, ou inégaux avec  $\bar{t}_1 < \bar{t}_2$ , alors le coût moyen des usagers non informés est  $\bar{C}^N = \bar{t}_1$ . Par différence avec (9.19), le gain relatif d'être informé vaut :

$$\Gamma^N = \sigma \cdot g(A/\sigma)$$

avec  $A = \alpha_1 + \gamma_1 x_1^N - \alpha_2 - \gamma_2 x_2^N - \gamma_2 q^I = \bar{t}_1 - \bar{t}_2 - (\gamma_1 + \gamma_2) x_1^I$ . Nous obtenons ainsi la formule générale pour  $\bar{t}_1 \leq \bar{t}_2$  :

$$\Gamma^N = \sigma \cdot g\left(\frac{\bar{t}_1 - \bar{t}_2 - (\gamma_1 + \gamma_2) x_1^I}{\sigma}\right)$$

### Cas à temps moyens inégaux

Si les temps moyens sont inégaux avec  $\bar{t}_1 < \bar{t}_2$  : alors les usagers non équipés  $N$  s'affectent uniquement sur le premier itinéraire, donc  $x_1^N = q^N = (1-r)Q$  et  $x_2^N = 0$  : on en tire  $A = \alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 q^N - \gamma_2 q^I = \alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 (1-r)Q - \gamma_2 rQ$  et donc

$$A = \alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 Q - (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot Q \cdot \beta$$

Nous obtenons ainsi le gain d'être informé sous forme analytique, comme une fonction du taux d'équipement  $\beta$  si l'on fixe  $Q$  et les paramètres de congestion  $\alpha_a, \gamma_a$  :

$$\Gamma^N = \sigma \cdot g\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 Q - (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot Q \cdot \beta}{\sigma}\right)$$

Cette fonction de  $\beta$  est décroissante puisque  $g$  est croissante. Autrement dit, la diffusion de l'équipement induit une baisse du profit individuel.

### Cas d'égalité des temps moyens

Dans le cas où les coûts moyens sont égaux, d'après le § 9.3.b, nous savons que

$$A = -(\gamma_1 + \gamma_2) q^I / 2$$

Nous en déduisons que :

$$\Gamma^N = \sigma g(-y) \text{ en posant } y = \frac{(\gamma_1 + \gamma_2) q^I}{2\sigma}$$

Le gain  $\Gamma^N$  est une fonction décroissante de  $y$ , ce qui nous permet de caractériser la sensibilité du modèle aux différents paramètres :

un taux d'équipement  $\beta$  croissant fait augmenter  $y$  donc décroître le gain.

Un volume total  $Q$  croissant fait augmenter  $y$  donc décroître le gain.



Des sensibilités à la congestion  $(\gamma_1 + \gamma_2)$  croissantes font décroître le gain.

La dispersion des perturbations aléatoires,  $\sigma = \sigma_{\Delta\zeta}$ , intervient de deux manières qui se renforcent mutuellement : un  $\sigma$  croissant fait décroître  $y$  donc croître  $g(y)$ , et le  $\sigma$  en facteur multiplicatif de  $g(y)$  amplifie la croissance du gain en fonction de la dispersion. Quand la dispersion tend vers zéro, le gain d'équipement aussi.

### ANNEXE 3. FORMULES DU CHAPITRE 7

#### Propriété symétrique des perturbations

Supposons que la variable aléatoire  $Z \equiv \zeta_2 - \zeta_1$  a une distribution symétrique, donc:

$$\int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF(z) + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF(z) = \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF(z) - \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{1/z} dF(z) = \int_{-\infty}^A z dF(z), \text{ puis:}$$

$$\int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF(z) + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF(z) = \tilde{F}(A)$$

#### Coût moyen pour la classe informée

Nous évaluons le coût moyen par usager de la classe informée qui est décrit comme suivant :

$$\bar{C}'_p = E_{\omega} [x'_{1\omega} t_{1\omega} + x'_{2\omega} t_{2\omega}] / q'$$

Pour le calculer, la méthode est d'effectuer une analyse conditionnelle à  $Z \equiv \zeta_2 - \zeta_1$  car à chaque occurrence  $\omega$ , la répartition des débits informés sur les deux routes est déduite à partir de la valeur  $z$  de  $Z$ , comparé aux quantités moyennes indépendantes à  $\omega$

Décomposons la formule en trois parties, associées à chaque sous-domaines  $z \in ]-\infty, A]$ ,  $z \in ]A, B]$  et  $z \in [B, +\infty[$ , respectivement:

$$\bar{C}'_p = \int_{-\infty}^A \bar{t}_{2/z} dF(z) + \frac{1}{q'} \int_A^B [x'_{1\omega} t_{1\omega} + x'_{2\omega} t_{2\omega}] dF(z) + \int_B^{+\infty} \bar{t}_{1/z} dF(z)$$

Dans laquelle  $\bar{t}_{a/z}$  signifie  $E[t_{a\omega} : \zeta_{2\omega} - \zeta_{1\omega} = z]$  i.e. l'espérance conditionnelle à la valeur  $z$  de  $Z$  :

si  $z \in ]-\infty, A]$  puis  $x'_{1\omega} = 0$ ,  $x'_{2\omega} = q'$  donc  $x'_{1\omega} t_{1\omega} + x'_{2\omega} t_{2\omega} = q' t_{2\omega}$ .

si  $z \in [B, +\infty[$  puis  $x_{1\omega}^I = q^I$ ,  $x_{2\omega}^I = 0$  donc  $x_{1\omega}^I t_{1\omega} + x_{2\omega}^I t_{2\omega} = q^I t_{1\omega}$ .

Les dernières parties est facile à évaluer car, notons  $\alpha_a^{I0} \equiv \alpha_a + \gamma_a \bar{x}_a^N$ , si  $z \in ]-\infty, A]$  puis  $\bar{t}_{2/z} = \alpha_2^{I0} + \gamma_2 q^I + \bar{\zeta}_{2/z}$ , pendent que si  $z \in [B, +\infty[$  puis  $\bar{t}_{1/z} = \alpha_1^{I0} + \gamma_1 q^I + \bar{\zeta}_{1/z}$ . Donc

$$\int_{-\infty}^A \bar{t}_{2/z}^I dF + \int_B^{+\infty} \bar{t}_{1/z}^I dF = (\alpha_2^{I0} + \gamma_2 q^I) F_A + (\alpha_1^{I0} + \gamma_1 q^I) (1 - F_B) + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_B^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF(z)$$

(A3a)

La partie en milieu, rappelons que si  $z \in [A, B]$  les usagers informés sont affectés en égalité des coûts  $T_{1\omega}^{\#I} = T_{2\omega}^{\#I}$ , qui induit à  $x_{1\omega}^I = (z - A)/\gamma_{\#}$  et  $x_{2\omega}^I = (B - z)/\gamma_{\#}$  avec  $\gamma_{\#} \equiv \gamma_1^I + \gamma_2^I$ .

Car  $x_{1\omega}^I t_{1\omega} + x_{2\omega}^I t_{2\omega} = q^I t_{1\omega} - x_{2\omega}^I (t_{1\omega} - t_{2\omega})$ , réécrivons la partie en milieu :

$$\begin{aligned} E\left[\frac{1}{q^I} \int_A^B \{x_{1\omega}^I t_{1\omega} + x_{2\omega}^I t_{2\omega}\} dF\right] &= E\left[\int_A^B t_{1\omega} dF\right] - E\left[\frac{1}{q^I} \int_A^B x_{2\omega}^I (t_{1\omega} - t_{2\omega}) dF\right] \\ &= \int_A^B \bar{t}_{1/z} dF - \frac{1}{q^I} \int_A^B E[x_{2\omega}^I (t_{1\omega} - t_{2\omega})] dF \end{aligned}$$

La première partie,  $\bar{t}_{1/z} = \alpha_1^{I0} + \gamma_1 x_{1\omega/z}^I + \bar{\zeta}_{1/z}$  avec  $x_{1\omega}^I = (z - A)/\gamma_{\#}$ . Puis:

$$\int_A^B \bar{t}_{1/z} dF = (\alpha_1^{I0} - \frac{\gamma_1}{\gamma_{\#}} A) (F_B - F_A) + \frac{\gamma_1}{\gamma_{\#}} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A) + \int_A^B \bar{\zeta}_{1/z} dF$$

Comme  $-A = \gamma_{\#} q^I - B$ , nous avons

$$\int_A^B \bar{t}_{1/z} dF = (\alpha_1^{I0} + \gamma_1 q^I) (F_B - F_A) + \frac{\gamma_1}{\gamma_{\#}} [\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(F_B - F_A)] + \int_A^B \bar{\zeta}_{1/z} dF$$

Et :

$$\begin{aligned} \bar{C}^I &= (\alpha_2^{I0} + \gamma_2 q^I) F_A + (\alpha_1^{I0} + \gamma_1 q^I) (1 - F_A) + \frac{\gamma_1}{\gamma_{\#}} [\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(F_B - F_A)] \\ &\quad - \frac{1}{q^I} \int_A^B E_z[x_{2\omega}^I (t_{1\omega} - t_{2\omega})] dF + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF \end{aligned}$$

Développons  $x_{2\omega}^I(t_{1\omega} - t_{2\omega})$ , ayant  $x_{2\omega}^I = (B - z) / \gamma_{\#}$  et

$$\begin{aligned} t_{1\omega} - t_{2\omega} &= \alpha_1^{I0} - \alpha_2^{I0} + \gamma_1(q' - x_{2\omega}^I) + \zeta_1 - \gamma_2 x_{2\omega}^I - \zeta_2 \\ &= B_0 - \gamma x_{2\omega}^I - z \text{ avec } B_0 \equiv \alpha_1^{I0} - \alpha_2^{I0} + \gamma_1 q' \text{ and } \gamma \equiv \gamma_1 + \gamma_2 \\ &= [\gamma_{\#} B_0 - \gamma B + (\gamma - \gamma_{\#})z] / \gamma_{\#} \end{aligned}$$

Thus  $x_{2\omega}^I(t_{1\omega} - t_{2\omega}) = \gamma_{\#}^{-2} (B - z) [\gamma_{\#} B_0 - \gamma B + (\gamma - \gamma_{\#})z]$ .

Integration from A to B yields that (recall that  $\tilde{F}(x) = \int_{-\infty}^x z^2 dF$ ):

$$\begin{aligned} \int_A^B E[x_{2\omega}^I(t_{1\omega} - t_{2\omega})] dF &= \gamma_{\#}^{-2} [\gamma B - \gamma_{\#} B_0] (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(F_B - F_A)) \\ &\quad - \gamma_{\#}^{-2} (\gamma - \gamma_{\#}) (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A)) \end{aligned} \quad (A5)$$

This ends up the computation of the average cost to an informed user:

$$\begin{aligned} \bar{C}^I &= (\alpha_2^{I0} + \gamma_2 q^I) F_A + (\alpha_1^{I0} + \gamma_1 q^I) (1 - F_A) \\ &\quad + \frac{\gamma_1 \gamma_{\#} q^I + \gamma_{\#} B_0 - \gamma B}{\gamma_{\#}^2 q^I} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(F_B - F_A)) \\ &\quad + \frac{\gamma - \gamma_{\#}}{\gamma_{\#}^2 q^I} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A)) + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF \end{aligned} \quad (A6)$$

### Equilibre de l'utilisateur

Sous le motif de l'équilibre de l'utilisateur, nous avons :  $\gamma_{\#} = \gamma$  et  $B_0 = B$ . Puis  $\bar{C}_{UE}^I$  est simplifiée comme suivant :

$$\bar{C}_{UE}^I = (\alpha_2^I + \gamma_2 q^I) F_A + (\alpha_1^I + \gamma_1 q^I) (1 - F_A) + \frac{\gamma_1}{\gamma_{\#}} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(F_B - F_A)) + \int_{-\infty}^A \dots + \int_A^{+\infty} \dots$$

En utilisant les formules de A, B et  $\bar{x}_a^I$ , elle est encore simplifiée:

$$\bar{C}_{UE}^I = \bar{t}_1 - A F_A + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF$$

En plus, sous une distribution symétrique de  $Z$

$$\bar{C}_{UE}^I = \bar{t}_1 - G(A)$$

Le temps moyen  $\bar{t}_1$  calculé à partir les conditions d'équilibre de long terme..

### **Coût moyen égaux**

L'égalité des coûts moyens conduit à :  $\bar{t}_1 = \bar{t}_2 = \bar{\theta} \equiv \frac{\gamma_1 \gamma_2 Q + \alpha_1 \gamma_2 + \alpha_2 \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$  et

$A = -\gamma Q \beta / 2$ , puis:

$$\bar{C}_{UE}^I = \bar{\theta} - G(A)$$

Le temps moyen à un usager non-informé est égal au temps moyen de chaque route :

$$\bar{C}_{UE}^N = \bar{\theta}$$

Qui induit le temps moyen de la classe informée:

$$\bar{C}_{UE} = \bar{\theta} - \beta G(A)$$

### **Inégalité des temps moyens**

Supposons que  $\bar{t}_1^N < \bar{t}_2^N$ , la classe  $N$  est affectée sur la route 1 seulement:  $\bar{x}_1^N = q^N$ ;  $\bar{x}_2^N = 0$ . Nous avons  $\alpha_1^I = \alpha_1 + \gamma_1 q^N$ ;  $\alpha_2^I = \alpha_2$ ; puis  $B = \alpha_1 - \alpha_2 + \gamma_1 Q$  qui est fixé avec les paramètres du réseau et  $Q$ ; puis  $A = B - \gamma q^I = B - \gamma Q \beta$ .

En nous basons sur  $\bar{x}_a^I$ ,  $\bar{t}_a^I$  nous avons:  $\bar{t}_1 = \alpha_1 + \gamma_1 Q - \frac{\gamma_1}{\gamma} G(B) + \frac{\gamma_1}{\gamma} G(A)$ . Nous pouvons dériver le temps moyen par usager informée:

$$\bar{C}_{UE}^I = \alpha_1 + \gamma_1 Q - \frac{\gamma_1}{\gamma} G(B) - \frac{\gamma_2}{\gamma} G(A)$$

Et le temps moyen à un usager non-informé:

$$\bar{C}_{UE}^N = \alpha_1 + \gamma_1 Q - \frac{\gamma_1}{\gamma} G(B) + \frac{\gamma_1}{\gamma} G(A)$$

Cela nous donne le temps moyen par usager pour l'ensemble du système :

$$\bar{C}_{UE} = \alpha_1 + \gamma_1 Q - \frac{\gamma_1}{\gamma} G(B) - (\frac{\gamma_1}{\gamma} - \beta) G(A)$$

### Optimum du système

Comme l'optimum du système signifie que les usagers sont totalement coopératifs, nous avons  $\gamma_{\#} = 2\gamma$ ,  $\alpha_a^{I0} = (\alpha_a^I + \alpha_a) / 2$  et  $\gamma_{\#} B_0 - \gamma B = \gamma(\alpha_1 - \alpha_2)$ . Décomposons  $\bar{C}_{SO}^I = \bar{C}_{SO,a}^I + \bar{C}_{SO,b}^I + \bar{C}_{SO,c}^I$  et :

$$\bar{C}_{SO,a}^I = \left( \frac{\alpha_2^I + \alpha_2}{2} + \gamma_2 q^I \right) F_A + \left( \frac{\alpha_1^I + \alpha_1}{2} + \gamma_1 q^I \right) (1 - F_A)$$

Rappelons que  $A = \alpha_1^I - \alpha_2^I - 2\gamma_2 q^I$ , nous avons :

$$\bar{C}_{SO,a}^I = \frac{\alpha_1(1 - F_A) + \alpha_2 F_A}{2} + \frac{\alpha_1^I + 2\gamma_1 q^I}{2} - \frac{1}{2} A F_A - \gamma_1 q^I F_A$$

Similairement  $(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(F_B - F_A)) / \gamma_{\#} = -\gamma_1 \bar{x}_2^I + \gamma_1 q^I F_A$ . Puis:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{SO,b}^I &= \frac{\gamma_1 \gamma_{\#} q^I + \gamma(\alpha_1 - \alpha_2)}{\gamma_{\#} q^I} \left( -\bar{x}_2^I + q^I F_A \right) \\ &= -\gamma_1 \bar{x}_2^I + \gamma_1 q^I F_A + \left( \frac{F_A}{2} - \frac{\bar{x}_2^I}{2q^I} \right) (\alpha_1 - \alpha_2) \end{aligned}$$

En faisant la somme des deux termes et  $\bar{t}_1^I = \alpha_1^I + 2\gamma_1 \bar{x}_1^I$ , nous avons:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{SO}^I &= \frac{1}{2} \bar{t}_1^I + \frac{\alpha_1}{2} - \frac{\bar{x}_2^I}{2q^I} (\alpha_1 - \alpha_2) - \frac{1}{2} A F_A - \frac{1}{4\gamma q^I} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A)) \\ &\quad + \int_{-\infty}^A \bar{\zeta}_{2/z} dF + \int_A^{+\infty} \bar{\zeta}_{1/z} dF \end{aligned}$$

Sous la symétrie de la variable de Z :

$$\bar{C}_{SO}^I = \frac{1}{2} \bar{t}_1^I + \frac{\alpha_1}{2} - \frac{\bar{x}_2^I}{2q^I} (\alpha_1 - \alpha_2) - \frac{1}{2} G(A) + \frac{1}{2} \tilde{F}_A - \frac{1}{4\gamma q^I} (\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A))$$

### Egalité des pseudo-coûts

Quand les pseudo-coûts sont égaux, nous avons:  $-A = B = \gamma q^I$ ,  $\tilde{F}_B = \tilde{F}_A$ ,  $F_A + F_B = 1$ ,  $\bar{x}_2^I = \frac{1}{2} q^I$  et  $\bar{t}_a^N = \bar{t}_a^I = \bar{\theta}_{\#} = \frac{2\gamma_1 \gamma_2 Q + \gamma_1 \alpha_2 + \gamma_2 \alpha_1}{2(\gamma_1 + \gamma_2)}$ .

Puis  $\bar{C}_{SO}^I$  est réduit à:

$$\bar{C}'_{so} = \frac{1}{2}\bar{t}'_1 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{4} - \frac{1}{2}G(A) - \frac{1}{4\gamma q'}(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A) + \frac{1}{2}\tilde{F}_A$$

Comme  $\frac{1}{2}\bar{t}'_1 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{4} = \bar{\theta} + \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{4\gamma}$ , nous avons:

$$\bar{C}'_{so} = \bar{\theta} + \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{4\gamma} - \frac{1}{2}G(A) - \frac{1}{4\gamma q'}(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A) + \frac{1}{2}\tilde{F}_A$$

Si Z est Gaussienne, nous avons:  $-\frac{1}{4\gamma q'}(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A) + \frac{1}{2}\tilde{F}_A = -\frac{\sigma^2}{4\gamma q'} + \frac{\sigma^2 F_A}{2\gamma q'}$ , donc:

$$\bar{C}'_{so} = \bar{\theta} + \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{4\gamma} - \frac{\sigma^2}{4\gamma\beta Q} - \frac{1}{2}G(A) + \frac{\sigma^2 F_A}{2\gamma\beta Q}$$

En utilisant  $A = -\gamma\beta Q$  pour la substitution, nous avons:

$$\bar{C}'_{so} = \bar{\theta} + \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{4\gamma} + \frac{\sigma^2}{4A} - \frac{AG(A) + \sigma^2 F_A}{2A}$$

Revenons à la condition d'égalité, nous avons:  $\bar{x}_1^N = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2\gamma} + \frac{\gamma_2}{\gamma}Q - \frac{1}{2}q'$ , puis:

$$\alpha_1 \bar{x}_1^N + \alpha_2 \bar{x}_2^N = \frac{\alpha_1 \gamma_2 + \alpha_2 \gamma_1}{\gamma} q^N - \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{2\gamma} - \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{2\gamma} q'$$

En combinant à  $\bar{C}_{so}^N = \frac{\bar{x}_1^N \bar{t}_1 + \bar{x}_2^N \bar{t}_2}{q^N} = \frac{\bar{\theta}_\#}{2} + \frac{\alpha_1 \bar{x}_1^N + \alpha_2 \bar{x}_2^N}{2q^N}$ , nous avons:

$$\bar{C}_{so}^N = \frac{\bar{\theta}_\#}{2} + \frac{\alpha_1 \gamma_2 + \alpha_2 \gamma_1}{2(\gamma_1 + \gamma_2)} - \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{4(\gamma_1 + \gamma_2)q^N} - \frac{q'(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{4(\gamma_1 + \gamma_2)q^N}$$

Comme  $\frac{\bar{\theta}_\#}{2} = \frac{\gamma_1 \gamma_2 Q}{\gamma_1 + \gamma_2} + \frac{\gamma_1 \alpha_2 + \gamma_2 \alpha_1}{2(\gamma_1 + \gamma_2)}$ , nous avons la formule finale

$$\bar{C}_{so}^N = \bar{\theta} - \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{4\gamma(1-\beta)Q} - \frac{\beta(\gamma_2 - \gamma_1)(\alpha_2 - \alpha_1)}{4\gamma(1-\beta)}$$

Et le coût moyen pour l'ensemble du trafic

$$\bar{C}_{SO} = \bar{\theta} - \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{4\gamma Q} - \frac{\sigma^2}{4\gamma Q} + \frac{AG(A) + \sigma^2 F_A}{2\gamma Q}$$

### Inégalité des pseudo-coûts

Supposons que  $\bar{t}_1^N < \bar{t}_2^N$ , la classe N est affectée sur la route 1 seulement:  $\bar{x}_1^N = q^N$ ;  $\bar{x}_2^N = 0$ ;  $\alpha_1^I = \alpha_1 + 2\gamma_1 q^N$ ;  $\alpha_2^I = \alpha_2$ . Puis  $B = \alpha_1 - \alpha_2 + 2\gamma_1 Q$  qui est fixé par les paramètres du réseau et  $Q$ ; et  $A = B - 2\gamma q^I = B - 2\gamma Q\beta$ .

Sous l'hypothèse Gaussienne:  $\tilde{F}_B - \tilde{F}_A - B(\tilde{F}_B - \tilde{F}_A) = \sigma^2(F_B - F_A) + 2\gamma Q\beta \tilde{F}_A$ . Nous avons en fin:

$$\begin{aligned}\bar{C}_{SO}^I &= \alpha_1 + \gamma_1 Q - \gamma_1 \bar{x}_2^I - \frac{\bar{x}_2^I}{2q^I} (\alpha_1 - \alpha_2) - \frac{1}{2} G(A) - \frac{\sigma^2}{4\gamma q^I} (F_B - F_A) \\ &= \alpha_1 + \gamma_1 Q - \left(\frac{\gamma_1}{2\gamma} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{4\gamma Q\beta}\right)(G(B) - G(A)) - \frac{1}{2} G(A) - \frac{\sigma^2}{4\gamma Q\beta} (F_B - F_A)\end{aligned}$$

Temps moyen à un usager non-informé est:

$$\begin{aligned}\bar{C}_{SO}^N &= \frac{1}{2} \bar{t}_1^I + \frac{\alpha_1}{2} \\ &= \alpha_1 + \gamma_1 Q - \frac{\gamma_1(G(B) - G(A))}{2\gamma}\end{aligned}$$

Temps moyen par usager pour l'ensemble du système est :

$$\begin{aligned}\bar{C}_{SO} &= \alpha_1 + \gamma_1 Q - \left(\frac{\gamma_1}{2\gamma} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{4\gamma Q}\right)(G(B) - G(A)) - \frac{1}{2} \beta G(A) - \frac{\sigma^2}{4\gamma Q} (F_B - F_A) \\ &= \alpha_1 + \gamma_1 Q - \frac{BG(B) - AG(A)}{4\gamma Q} - \frac{\sigma^2(F_B - F_A)}{4\gamma Q}\end{aligned}$$

(A16a)

$\bar{C}_{SO}$  peut être réécrit comme:

$$\bar{C}_{SO} = \alpha_1 + \gamma_1 Q - \frac{BG(B) + \sigma^2 F_B}{4\gamma Q} + \frac{AG(A) + \sigma^2 F_A}{4\gamma Q}$$

### Problème de point-fixe

En cas d'égalité des pseudo-coûts, posons  $\theta^N \equiv T_a^{\#N} = T_b^{\#N}$ . Comme

$B = \alpha_1 + \gamma_1^{NI} \bar{x}_1^N - \alpha_2 - \gamma_2^{NI} \bar{x}_2^N + \gamma_1^{II} q^I$ , nous avons:

$$\begin{aligned} B &= \alpha_1 + \gamma_1^{NI} \bar{x}_1^N - \alpha_2 - \gamma_2^{NI} \bar{x}_2^N + \gamma_1^{II} q^I \\ &= \alpha_1 + \gamma_1^{NI} \frac{\theta^N - \alpha_1 - \gamma_1^{IN} \bar{x}_1^I}{\gamma_1^{NN}} - \alpha_2 - \gamma_2^{NI} \frac{\theta^N - \alpha_2 - \gamma_2^{IN} \bar{x}_2^I}{\gamma_2^{NN}} + \gamma_1^{II} (\bar{x}_1^I + \bar{x}_2^I) \\ &= \alpha_1 \left(1 - \frac{\gamma_1^{NI}}{\gamma_1^{NN}}\right) - \alpha_2 \left(1 - \frac{\gamma_2^{NI}}{\gamma_2^{NN}}\right) + \theta^N \left(\frac{\gamma_1^{NI}}{\gamma_1^{NN}} - \frac{\gamma_2^{NI}}{\gamma_2^{NN}}\right) + \bar{x}_1^I \left(\gamma_1^{II} - \frac{\gamma_1^{NI} \gamma_1^{IN}}{\gamma_1^{NN}}\right) + \bar{x}_2^I \left(\gamma_1^{II} + \frac{\gamma_2^{NI} \gamma_2^{IN}}{\gamma_2^{NN}}\right) \end{aligned}$$

Comme  $\gamma_1^{uv} / \gamma_1 = \gamma_2^{uv} / \gamma_2 \quad \forall u, v \in \{N, I\}$  et  $\bar{x}_1^I + \bar{x}_2^I = q^I$ , nous avons:

$$B = (\alpha_1 - \alpha_2) \left(1 - \frac{\gamma_1^{NI}}{\gamma_1^{NN}}\right) + q^I \gamma_1^{II} \left(1 - \frac{\gamma_1^{NI} \gamma_1^{IN}}{\gamma_1^{NN} \gamma_1^{II}}\right) + \bar{x}_2^I \gamma^{\#} \frac{\gamma_1^{NI} \gamma_1^{IN}}{\gamma_1^{NN} \gamma_1^{II}}$$

On déduit  $\bar{x}_2^I$  de l'équation ci-dessus:

$$\gamma_{\#} \bar{x}_2^I = mB - n$$

$$\text{Dans lequel: } m = \frac{\gamma_1^{NN} \gamma_1^{II}}{\gamma_1^{NI} \gamma_1^{NI}}; \quad n = (\alpha_1 - \alpha_2) \left(1 - \frac{\gamma_1^{NI}}{\gamma_1^{NN}}\right) \frac{\gamma_1^{NN} \gamma_1^{II}}{\gamma_1^{NI} \gamma_1^{NI}} + q^I \gamma_1^{II} \left(\frac{\gamma_1^{NN} \gamma_1^{II}}{\gamma_1^{NI} \gamma_1^{NI}} - 1\right)$$

En combinant les équations ci-dessus nous avons une équation de B:

$$G(B) - G(B - \gamma_{\#} q^I) - mB + n = 0$$

En cas de comportement homogènes, nous avons :

$\gamma_a^{II} / \gamma_a = \gamma_a^{NN} / \gamma_a = \gamma_a^{NI} / \gamma_a = \gamma_a^{IN} / \gamma_a$  qui conduit à  $m=1$  and  $n=1$ . Puis, l'équation donne une solution unique  $B = D/2$ , donc  $\bar{x}_a^I = q^I / 2$ .



## Liste des illustrations

---

Fig. 0–1 : Cadre général de la modélisation .....	- 12 -
Fig. 1–1 : Multiplicité des interactions entre l'information de trafic et d'autres composantes .....	- 24 -
Fig. 1–2 : La structure du mémoire .....	- 30 -
Fig. 2–1 : Acteurs et flux d'information .....	- 47 -
Fig. 2–2 : La formation du contenu « réseau » .....	- 52 -
Fig. 2–3 : La formation du contenu « itinéraire exploitant » .....	- 53 -
Fig. 2–4 : Formation du contenu « itinéraire usager » .....	- 54 -
Fig. 2–5 : Lieu cible potentiel, itinéraire usager et itinéraire exploitant .....	- 54 -
Fig. 2–6 : Formation du contenu « Trafic » .....	- 55 -
Fig. 3–1 : Débit moyen par tranche horaire sur la Francilienne A104 en 2008 .....	- 61 -
Fig. 3–2 : Rapport TMJE/TMJA dans la vallée du Rhône en 2002 .....	- 62 -
Fig. 3–3 : Répartition de congestion par type, notamment récurrente vs. Non-récurrente .....	- 63 -
Fig. 3–4 : Relation débit-vitesse : observation et modélisation (OCDE, 2007) .....	- 64 -
Fig. 3–5 : Schéma des actions de l'exploitation du trafic .....	- 66 -
Fig. 3–6 : Répartition du réseau magistral par gestionnaires .....	- 71 -
Fig. 3–7 : Composantes d'un système d'exploitation routière. Source : (Middelham, 2008) .....	- 72 -
Fig. 3–8 : Phasage et temps admis à une intersection « T » .....	- 73 -
Fig. 3–9 : Stockage des véhicules dans le cas non-régulé (a) et régulé (b) .....	- 75 -
Fig. 3–10 : Les seuils de déclenchement des limites de vitesse et des informations associées à diffuser aux usagers via PMV. (exemp) .....	- 79 -
Fig. 3–11 : Illustration d'un itinéraire Bis .....	- 86 -
Fig. 3–12 : Illustration des itinéraire S .....	- 87 -
Fig. 3–13 : Structure d'une base de données pour l'exploitation du trafic .....	- 90 -
Fig. 3–14 : Procédure de traitement de données .....	- 100 -
Fig. 3–15 : Processus de qualification des données .....	- 101 -
Fig. 3–16 : Les niveaux de services selon la méthode HCM 2000 et la méthode française .....	- 104 -
Fig. 4–1 : Rapport des sous-systèmes et le rôle de l'information dans le comportement de choix .....	- 119 -
Fig. 4–2 : Trois structures de décision. Source : (Bovy et Stern, 1990) .....	- 120 -
Fig. 4–3 : Aspects dynamiques dans le choix d'itinéraire en présence d'information. Source Ben-Akiva et al. 1991 .....	- 128 -
Fig. 5–1 : Interaction offre – demande dans un marché des services de transport. Source : (Leurent, 2004) .....	- 133 -
Fig. 5–2 : Illustration de la perception des options de choix par usager .....	- 136 -
Fig. 5–3 : La relation temps – débit observée .....	- 139 -
Fig. 5–4 : Un modèle temps – taux de chargement .....	- 140 -

Fig. 5-5 : Les parts de marché pour les deux options selon les arbitrages.....	143 -
Fig. 5-6 : Répartition entre deux options en fonction du paramètre $\theta$ .....	148 -
Fig. 5-7 : Comparaison Logit- Probit avec le problème de superposition. Source (Sheffi, 1985) .....	149 -
Fig. 5-8 : Problème de superposition entre les options .....	154 -
Fig. 5-9 : Sub Network (Bierlaire et Frejinger, 2005) .....	156 -
Fig. 5-10 : La hiérarchisation des options de choix dans le modèle Logit emboîté.-	157 -
Fig. 5-11 : Réseau GEV .....	159 -
Fig. 6-1 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination -	174 -
Fig. 6-2 : Observation débit temps unitaire et plusieurs modèle débit-temps. Source : Leurent, 2006.....	175 -
Fig. 6-3 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps.....	176 -
Fig. 6-4 : Dépendances logiques entre les hypothèses .....	180 -
Fig. 6-5 : Distribution des perturbations selon l'hypothèse (à gauche) et de l'écart entre les deux perturbations (à droite).....	187 -
Fig. 6-6 : Fonction pour mesurer le gain de l'information.....	187 -
Fig. 6-7 : Coûts moyens à Q=20: (a) Cas Gaussien; (b) Cas Bernoulli-Exponentiel..-	190 -
Fig. 6-8 : Coûts moyens à Q=130: (a) Cas Gaussien; (b) Cas Bernoulli-Exponentiel-	190 -
Fig. 6-9 : Domaines d'égalité et d'inégalité des temps moyens en fonction de $\beta$ and Q .....	191 -
Fig. 6-10 : Coût moyens donnés par le modèle à la Maher et Hughes à Q=20 (a) et Q=130 (b).....	192 -
Fig. 6-11 : Temps moyens donnés par modèle grossier à Q=20 (a) et Q=130 (b) ...-	193 -
Fig. 7-1 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination -	200 -
Fig. 7-2 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps.....	200 -
Fig. 7-3 : Distribution gaussienne des perturbations.....	201 -
Fig. 7-4 : Les dépendances logiques dans le modèle.....	206 -
Fig. 7-5 : Fonction mesurant le gain individuel de l'information.....	215 -
Fig. 7-6 : Net1, Taux d'affectation des usagers non-informés sur l'arc 1 sous (a) UE, (b) SO, (c) IC.....	223 -
Fig. 7-7 : Taux d'affectation des usagers informés sur l'arc 1 sous (a) UE, (b) SO, (c) IC.....	223 -
Fig. 7-8 : Coût moyen par usager selon la stratégie d'information, demande faible Q=10 .....	224 -
Fig. 7-9 : Coût moyen par usager selon la stratégie d'information, demande forte Q=100 .....	224 -
Fig. 7-10 : Coût moyen pour deux classes et pour l'ensemble du trafic sur le NET1 à Q=10.....	225 -

Fig. 7-11 : Coût moyen pour deux classes et pour l'ensemble du trafic sur le NET2 à Q=10 .....	- 225 -
Fig. 7-12 : Coût moyen pour deux classes et pour l'ensemble du trafic sur le NET1 à Q=100 .....	- 226 -
Fig. 7-13 : Coût moyen pour deux classes et pour l'ensemble du trafic sur le NET2 à Q=10 .....	- 226 -
Fig. 7-14 : Gain social et gain privé de l'information sur le NET1 à Q=10 .....	- 227 -
Fig. 7-15 : Gain social et gain privé de l'information sur le NET2 à Q=10 .....	- 228 -
Fig. 7-16 : Gain social et gain privé de l'information sur le NET1 à Q=100 ....	- 228 -
Fig. 7-17 : Gain social et gain privé de l'information sur le NET2 à Q=100 ....	- 229 -
Fig. 8-1 : Tarification optimal. Source : (Lindsey et Verhoef, 2000).....	- 236 -
Fig. 8-2 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination - 239 -	
Fig. 8-3 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps .....	- 240 -
Fig. 8-4 : Distribution gaussienne des perturbations .....	- 240 -
Fig. 8-5 : Dépendances logiques dans le modèle .....	- 243 -
Fig. 8-6 : Temps moyen par déplacement à faible volume de demande Q=10 sous différents plan de gestion .....	- 252 -
Fig. 8-7 : Temps moyen par déplacement à fort volume de demande Q=100 sous différents plan de gestion .....	- 253 -
Fig. 9-1 : Réseau de deux routes parallèles reliant une origine et une destination - 258 -	
Fig. 9-2 : Modèle affine linéaire de la relation débit-temps .....	- 259 -
Fig. 9-3 : Distribution gaussienne des perturbations .....	- 260 -
Fig. 9-4. Structure du bi-niveau équilibre avec les stratégies de gestion de capacité .....	- 263 -
Fig. 9-5 : Relation entre les variables : stratégie d'allocation de capacité fixe- 264 -	
Fig. 9-6 : Fonction $\bar{C}(\bar{\lambda})$ et ses sous-fonction .....	- 269 -
Fig. 9-7 : Relation entre les variables : stratégie d'allocation de capacité fixe- 270 -	
Fig. 9-8 : Trois stratégies : (a)« sans allocation de capacité », (b) allocation fixe et (c) variable à faible demande Q=10 .....	- 276 -
Fig. 9-9 : Trois stratégies : (a)« sans allocation de capacité », (b) allocation fixe et (c) variable à faible demande Q=100 .....	- 276 -



## Liste des tableaux

---

Tab. 1-1 : Les méthodes de lutte contre la congestion classées par approche et par échelle de temps.....	- 20 -
Tab. 2-1 : Opérateurs de radio trafic sur les réseaux concédés.....	- 45 -
Tab. 2-2 : Services, fournisseurs et conditions d'accès.....	- 47 -
Tab. 2-3 : Croissement contenus-dispositifs d'information routière.....	- 57 -
Tab. 3-1 : Catégories de route, responsable, décideur et gestionnaire correspondants, source : <a href="http://www.route.equipement.gouv.fr">www.route.equipement.gouv.fr</a> .....	- 70 -
Tab. 3-3 : Comparaison approche « offre » et approche « demande ».....	- 88 -
Tab. 3-4 : Résumé des mesures d'exploitation .....	- 89 -
Tab. 3-5 : Lien entre les mesures d'exploitation du trafic et l'information aux usagers .....	- 89 -
Tab. 3-6 : Les capteurs existant sur le marché français- Source : Cété Normandie, « les outils de recueil de données de trafic routier » .....	- 95 -
Tab. 3-7 : Comparaison entre « Level of service » de HCM 2000 américain et niveau de service en France.....	- 105 -
Tab. 4-1 : Les facteurs qui influencent le choix de déplacement.....	- 118 -
Tab. 4-2 : Changement d'itinéraire ou/et d'horaire sous l'impact de l'information diffusée via la radio trafic (Mannering, 1989) .....	- 123 -
Tab. 4-3 : Taux des usagers influencés par l'information du trafic dans les zones urbaines californiennes. Source Yim et al. 2004.....	- 123 -
Tab. 4-4 : Types de changement constatés (suite du Tab. 4-3). Source : (Yim, Khattak <i>et al.</i> , 2004).....	- 123 -
Tab. 4-5 : Répartition de l'usage de l'information par dispositif en Californie. Source : (Yim, Khattak <i>et al.</i> , 2004).....	- 127 -
Tab. 4-6 : Répartition des usagers qui n'utilisent pas de l'information dans leur décision. Source (Yim, Khattak <i>et al.</i> , 2004) .....	- 127 -
Tab. 7-1 : Les fonctions de pseudo-coût par classe par motif de comportement..	- 204 -
Tab. 7-2 : Les fonctions de pseudo coût simplifiées par classe par motif de comportement .....	- 204 -
Tab. 8-1 : Plan de gestion combinant l'information aux usagers et la tarification de la congestion .....	- 250 -
Tab. 9-1 : Les minima et minimum en fonction de Z.....	- 273 -
Tab. 9-2 : Temps moyens et gain sous différentes stratégies.....	- 275 -



## Table des matières

---

Résumé.....	- 5 -
Mots clés .....	- 5 -
Abstract .....	- 7 -
Keywords.....	- 7 -
Résumé long.....	- 9 -
Contexte .....	- 9 -
Revue de littérature .....	- 10 -
Objectifs .....	- 11 -
Cadre de la modélisation .....	- 12 -
Enseignements .....	- 13 -
Sommaire .....	- 15 -
Chapitre 1. Introduction générale.....	- 19 -
1.1. Contexte .....	- 19 -
1.1.1. La congestion routière de multiples sources .....	- 19 -
1.1.2. Système de gestion dynamique du trafic.....	- 20 -
1.1.3. Service d'information du trafic aux usagers .....	- 21 -
1.1.4. Les acteurs concernés .....	- 22 -
1.2. Problématique.....	- 23 -
1.2.1. Comportements des usagers face à l'information.....	- 23 -
1.2.2. Multiplicité des interactions dans un système complexe.....	- 23 -
1.2.3. Modèle économique des services d'information routière .....	- 25 -
1.3. Objectifs .....	- 25 -
1.3.1. Conception d'un modèle adressé à l'analyse de l'information routière -	25 -
1.3.2. Application analytique pour un cas d'école.....	- 26 -
1.4. Méthodologie.....	- 26 -
1.4.1. Les trois natures du modèle.....	- 27 -
1.4.2. Jeu d'hypothèses simple mais assez réaliste .....	- 28 -
1.5. Contenu du mémoire .....	- 29 -
1.5.1. Développement du sujet.....	- 30 -
1.5.2. Revues de littérature.....	- 30 -
1.5.3. Modélisation des effets de l'information .....	- 31 -
1.5.4. Modélisation conjointe de l'information routière et des mesures	
d'exploitation .....	- 31 -
Partie I. Service d'information dans un système routier.....	- 33 -
Chapitre 2. Services d'information routière aux usagers .....	- 37 -
2.1. Introduction .....	- 37 -
2.1.1. Contexte .....	- 37 -
2.1.2. Objectif.....	- 37 -
2.1.3. Contenu.....	- 37 -

2.2. Supports d'information routière .....	38 -
2.2.1. Supports papiers.....	38 -
2.2.2. Signalisation.....	39 -
2.2.3. Dispositifs de guidage nomades.....	43 -
2.2.4. Médias .....	44 -
2.2.5. Flux d'information routière aux usagers .....	47 -
2.3. Contenus d'information routière .....	47 -
2.3.1. Désagrégation : composantes d'information routière.....	48 -
2.3.2. Agrégation : contenu d'information routière.....	51 -
2.4. Croisement des contenus et des dispositifs .....	56 -
2.5. Conclusion du chapitre .....	58 -
Chapitre 3. Information routière et exploitation du trafic.....	59 -
3.1. Introduction .....	59 -
3.1.1. Contexte .....	59 -
3.1.2. Objectif .....	59 -
3.1.3. Contenu .....	59 -
3.2. Réseau routier .....	60 -
3.2.1. Composition de la demande.....	60 -
3.2.2. Formation de l'offre .....	62 -
3.2.3. Exploitation du trafic .....	64 -
3.2.4. Hiérarchie des réseaux .....	67 -
3.2.5. Exploitant et les acteurs concernés.....	70 -
3.3. Les mesures d'exploitation .....	72 -
3.3.1. Feux à intersection .....	73 -
3.3.2. La régulation d'accès .....	75 -
3.3.3. Régulation de vitesse.....	78 -
3.3.4. Tarification.....	81 -
3.3.5. Allocation variable de voies.....	83 -
3.3.6. Guidage des usagers par information .....	85 -
3.3.7. Le lien entre exploitation et information aux usagers .....	88 -
3.4. Recueillement de données .....	90 -
3.4.1. Données pour l'exploitation du trafic .....	90 -
3.4.2. Outils et méthodes de mesure .....	93 -
3.4.3. Constitution d'une base de données.....	98 -
3.5. Traitement de données .....	99 -
3.5.1. Qualification des données .....	100 -
3.5.2. Détection automatique des incidents .....	102 -
3.5.3. Caractérisation de l'état du trafic.....	104 -
3.5.4. Temps de parcours .....	105 -
3.5.5. Prévision du trafic.....	106 -
3.6. Conclusion du chapitre .....	107 -
Partie II. Analyses bibliographiques .....	109 -
Chapitre 4. Comportements des usagers : évidences empiriques.....	113 -
4.1. Introduction .....	113 -
4.1.1. Contexte .....	113 -



4.1.2. Objectif .....	- 113 -
4.1.3. Contenu .....	- 113 -
4.2. Champs d'analyse bibliographique .....	- 114 -
4.2.1. Chronologie des études .....	- 114 -
4.2.2. Synthèse des approches.....	- 115 -
4.2.3. Méthode de lecture .....	- 116 -
4.3. Synthèse des concepts .....	- 116 -
4.3.1. Vue d'ensemble du système routier .....	- 117 -
4.3.2. Le sous-système réseau .....	- 119 -
4.3.3. Le sous-système usager .....	- 119 -
4.3.4. Interaction usager – réseau .....	- 121 -
4.3.5. Interaction réseau – information – usager .....	- 121 -
4.3.6. Comportement de conduite .....	- 124 -
4.4. Caractères et comportements individuels.....	- 124 -
4.4.1. Caractères individuels .....	- 124 -
4.4.2. Accès à l'information .....	- 126 -
4.4.3. Acquisition de l'information et apprentissage.....	- 128 -
4.5. Réseau routier et offre de l'information.....	- 129 -
4.5.1. Réseau routier .....	- 130 -
4.5.2. Offre de l'information .....	- 130 -
4.6. Conclusion du chapitre.....	- 131 -
Chapitre 5. Modèles de choix d'itinéraire et d'affectation du trafic .....	- 133 -
5.1. Introduction .....	- 133 -
5.1.1. Contexte .....	- 133 -
5.1.2. Objectif.....	- 134 -
5.1.3. Contenu.....	- 134 -
5.2. Rappel de modèles comportementaux.....	- 134 -
5.2.1. Processus de décision .....	- 134 -
5.2.2. Perception des options de choix.....	- 136 -
5.2.3. Préférences personnelles.....	- 137 -
5.3. Modèles déterministes .....	- 137 -
5.3.1. Notion de coût généralisé.....	- 137 -
5.3.2. Représentation de la congestion et équilibre de l'utilisateur .....	- 139 -
5.3.3. Optimum du système.....	- 140 -
5.4. Segmentation de la demande .....	- 141 -
5.4.1. Segmentation multi – classe .....	- 141 -
5.4.2. Segmentation multicritère.....	- 142 -
5.4.3. Segmentation temporelle .....	- 143 -
5.4.4. Segmentation combinée .....	- 143 -
5.5. Modèles stochastiques .....	- 143 -
5.5.1. Interprétation économique .....	- 145 -
5.5.2. Modèle Multinomial Logit.....	- 146 -
5.5.3. Modèle Multinomial Probit.....	- 146 -
5.5.4. Modèle d'équilibre stochastique de l'utilisateur .....	- 147 -
5.5.5. Sur l'interprétation des perturbations aléatoires.....	- 148 -

5.6. Modèles stochastiques avancés .....	150 -
5.6.1. Sélection des options de choix .....	150 -
5.6.2. Modèles Logit avancés .....	154 -
5.6.3. Modèle Prix-Temps stochastique .....	160 -
5.7. Modèles d'apprentissage .....	161 -
5.7.1. Approche « moyenne pondérée » .....	161 -
5.7.2. Approche « espérance adaptive » .....	162 -
5.7.3. Approche bayésienne .....	163 -
5.8. Conclusion du chapitre .....	163 -
Partie III. Modélisation des effets de l'information routière.....	165 -
Chapitre 6. Effets de l'information routière sur l'équilibre de l'utilisateur.....	169 -
6.1. Introduction.....	169 -
6.1.1. Contexte .....	169 -
6.1.2. Revue bibliographique.....	171 -
6.1.3. Objectif .....	172 -
6.1.4. Méthode .....	173 -
6.1.5. Contenu .....	173 -
6.2. Formulation des hypothèses .....	174 -
6.2.1. L'offre de transport .....	174 -
6.2.2. La demande .....	177 -
6.2.3. L'équilibre offre-demande bi-niveau.....	179 -
6.3. Analyse d'équilibre du trafic.....	181 -
6.3.1. Affectation instantanée des usagers informés.....	181 -
6.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne des usagers informés .....	182 -
6.3.3. Affectation des usagers non-informés .....	182 -
6.3.4. Caractérisation du problème de point-fixe .....	183 -
6.3.5. Indicateurs d'utilité .....	183 -
6.4. Analyse paramétrique et numérique .....	184 -
6.4.1. Propriété de l'écart des perturbations.....	185 -
6.4.2. Analyse paramétrique du gain de l'information par rapport à la variabilité des perturbations .....	188 -
6.4.3. Cas d'égalité des temps moyens .....	188 -
6.4.4. Sensibilité du gain de l'information au taux d'équipement.....	189 -
6.4.5. Sensibilité du gain de l'information au volume de demande .....	191 -
6.5. Discussions.....	192 -
6.5.1. Sur le modèle à la Maher et Hughes (1995).....	192 -
6.5.2. Sur modèle amélioré avec un traitement grossier.....	193 -
6.6. Conclusion du chapitre .....	194 -
6.6.1. Récapitulation.....	194 -
6.6.2. Recommandation pour les études d'évaluation .....	194 -
6.6.3. Pistes de développement .....	195 -
Chapitre 7. Divers motifs de comportement et optimisation du trafic .....	197 -
7.1. Introduction.....	197 -
7.1.1. Contexte .....	197 -
7.1.2. Revue bibliographique.....	198 -

7.1.3. Objectif.....	- 198 -
7.1.4. Méthode.....	- 199 -
7.1.5. Plan du chapitre .....	- 199 -
7.2. Formulation des hypothèses.....	- 200 -
7.2.1. L'offre de transport .....	- 200 -
7.2.2. La demande : comportement individuel et motifs de coopération -	201 -
7.2.3. Les fonctions de pseudo-coût .....	- 203 -
7.2.4. Pseudo-équilibre offre-demande.....	- 204 -
7.3. Analyse d'équilibre.....	- 206 -
7.3.1. Affectation instantanée des usagers informés .....	- 206 -
7.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne des usagers informés.....	- 207 -
7.3.3. Affectation des usagers non-équipés .....	- 208 -
7.3.4. Caractérisation du problème de point fixe .....	- 208 -
7.3.5. Simplification par hypothèses symétriques.....	- 209 -
7.4. Acteurs et indicateurs .....	- 209 -
7.4.1. Relation entre les acteurs .....	- 209 -
7.4.2. Coûts moyens.....	- 210 -
7.4.3. Gain privé de l'information .....	- 211 -
7.4.4. Coûts externes marginaux .....	- 211 -
7.4.5. Gain externe de l'information.....	- 213 -
7.5. Sur le motif d'équilibre de l'utilisateur (rappel) .....	- 213 -
7.5.1. Coût moyen par classe d'utilisateurs.....	- 213 -
7.5.2. Gain privé : analyse de sensibilité.....	- 214 -
7.5.3. Coût social marginal .....	- 215 -
7.6. Sur le motif d'optimum du système .....	- 215 -
7.6.1. Une définition d'optimum bi-niveau .....	- 216 -
7.6.2. Coûts moyens par classe .....	- 217 -
7.6.3. Analyse de sensibilité .....	- 218 -
7.6.4. Coût externe marginal .....	- 219 -
7.7. L'équilibre de l'utilisateur versus l'optimum du système .....	- 219 -
7.7.1. Coût moyen .....	- 219 -
7.7.2. Coût global .....	- 220 -
7.7.3. Coût moyen par classe d'utilisateurs.....	- 220 -
7.8. Application à la gestion et à l'optimisation du trafic .....	- 221 -
7.8.1. Stratégie d'information et gestion du système .....	- 221 -
7.8.2. Les indicateurs économiques, interprétation liée à la gestion du trafic -	222 -
7.8.3. Simulation numérique : coûts moyens d'ensemble .....	- 223 -
7.8.4. Simulation numérique : coûts moyens par classe .....	- 224 -
7.8.5. Simulation numérique : gains de l'information dynamique .....	- 227 -
7.8.6. Bilan des stratégies d'information .....	- 229 -
7.9. Conclusion du chapitre.....	- 229 -
Partie IV. Gestion du trafic et information aux usagers .....	- 231 -
Chapitre 8. Tarification de la congestion et information aux usagers.....	- 235 -

8.1. Introduction .....	235 -
8.1.1. Contexte .....	235 -
8.1.2. Revue bibliographique.....	236 -
8.1.3. Objectif .....	237 -
8.1.4. Méthode .....	238 -
8.1.5. Contenu du chapitre.....	238 -
8.2. Formulation des hypthèses .....	239 -
8.2.1. L'offre de transport .....	239 -
8.2.2. Les stratégies de tarification .....	241 -
8.2.3. La demande .....	241 -
8.2.4. L'équilibre offre-demande.....	242 -
8.2.5. Indicateurs de congestion .....	243 -
8.3. Stratégie « Sans tarification ».....	244 -
8.3.1. Affectation instantanée de la classe informée.....	244 -
8.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne de la classe informée .....	245 -
8.3.3. Affectation de la classe non-informée .....	246 -
8.3.4. Caractérisation du point fixe de l'équilibre offre-demande .....	246 -
8.3.5. Résultats analytiques pour le cas des coûts moyens égaux.....	246 -
8.4. Stratégie « tarification fixe » .....	247 -
8.4.1. Tarif fixe (de péage) optimal .....	247 -
8.4.2. Affectation du trafic .....	247 -
8.4.3. Résultats analytiques pour le cas des coûts moyens égaux.....	248 -
8.5. Stratégie « tarification dynamique ».....	248 -
8.5.1. Tarif de péage dynamiquement optimal.....	248 -
8.5.2. Affectation du trafic en optimum du système .....	249 -
8.5.3. Résultats analytiques pour le cas des coûts moyens égaux.....	249 -
8.6. Comparaison de différents plans de gestion du trafic .....	250 -
8.6.1. Plans de gestion du trafic .....	250 -
8.6.2. Analyse analytique.....	250 -
8.6.3. Investigation numérique .....	251 -
8.7. Conclusion du chapitre .....	253 -
Chapitre 9. Gestion de capacité et information aux usages .....	255 -
9.1. Introduction.....	255 -
9.1.1. Contexte .....	255 -
9.1.2. Revue bibliographique.....	256 -
9.1.3. Objectif .....	257 -
9.1.4. Méthode .....	258 -
9.1.5. Structure du chapitre .....	258 -
9.2. Formulation des hypothèses .....	258 -
9.2.1. L'offre de transport .....	258 -
9.2.2. Allocation de capacité et stratégies d'optimisation.....	260 -
9.2.3. La demande .....	262 -
9.2.4. L'équilibre offre-demande.....	263 -
9.2.5. Indicateurs de la performance du système.....	264 -
9.3. Allocation fixe de capacité.....	264 -

9.3.1. Affectation instantanée et moyenne des usagers informés.....	265 -
9.3.2. Affectation conditionnelle et moyenne des usagers informés.....	265 -
9.3.3. Affectation des usagers non-formés.....	266 -
9.3.4. Plan de capacité statique optimal.....	267 -
9.3.5. Les indicateurs économiques.....	269 -
9.4. Allocation dynamique de capacité.....	270 -
9.4.1. Affectation instantanée des usagers informés .....	270 -
9.4.2. Allocation de capacité dynamiquement optimale.....	272 -
9.4.3. Affectation moyenne des usagers non-informés et informés.....	273 -
9.4.4. Indicateurs économiques.....	274 -
9.5. Comparaison des stratégies d'allocation de capacité .....	275 -
9.5.1. Analyse analytique .....	275 -
9.5.2. Investigation numérique.....	275 -
9.6. Conclusion du chapitre.....	277 -
Chapitre 10. Conclusion générale .....	279 -
10.1. Récapitulation .....	279 -
10.1.1. Description des services d'information routière .....	279 -
10.1.2. Revue de littérature sur les comportements des usagers.....	280 -
10.1.3. Revue de littérature sur les modèles existants.....	280 -
10.1.4. Modélisation des effets de l'information dynamique .....	281 -
10.1.5. Contenus coopératifs et optimisation du trafic.....	282 -
10.1.6. Effets conjoints des mesures d'exploitation.....	282 -
10.2. Limites du travail et pistes de développement.....	283 -
10.2.1. Représentation de l'offre.....	283 -
10.2.2. Représentation de la demande.....	284 -
10.2.3. Représentation des services d'information.....	285 -
10.2.4. Représentation des mesures d'exploitation.....	287 -
10.2.5. Passage en affectation dynamique ou/et en grand réseau.....	287 -
Bibliographie .....	289 -
Notation .....	307 -
Liste des publications associées.....	309 -
Annexes.....	311 -
Annexe 1. Propriété des distributions probabilistes .....	311 -
Variable aléatoire gaussienne.....	311 -
Variable aléatoire Bernoulli-exponentielle .....	312 -
Minimum de deux variables aléatoires.....	313 -
Annexe 2. Formules du chapitre 6 .....	313 -
Formules du débit d'arc moyen des usagers informés.....	313 -
Cas des coûts moyens inégaux.....	314 -
Cas d'égalité des coûts moyens .....	314 -
Condition d'inégalité des coûts moyens .....	315 -
Détermination concrète de l'état d'équilibre .....	317 -
Le coût moyen dans le cas gaussien .....	318 -
Formulation du gain d'information.....	319 -
Cas à temps moyens inégaux .....	320 -

Cas d'égalité des temps moyens .....	320 -
Annexe 3. Formules du chapitre 7 .....	321 -
Propriété symétrique des perturbations .....	321 -
Coût moyen pour la classe informée .....	321 -
Equilibre de l'utilisateur .....	323 -
Optimum du système .....	325 -
Problème de point-fixe .....	328 -
Liste des illustrations .....	329 -
Liste des tableaux .....	333 -
Table des matières .....	335 -